



HAL
open science

Science opérative et ingénierie sémiotique : des machines graphiques à la morphogenèse organique

Fabien Ferri

► **To cite this version:**

Fabien Ferri. Science opérative et ingénierie sémiotique : des machines graphiques à la morphogenèse organique. Philosophie. Université de Technologie de Compiègne, 2021. Français. NNT : 2021COMP2672 . tel-04085764

HAL Id: tel-04085764

<https://theses.hal.science/tel-04085764>

Submitted on 30 Apr 2023

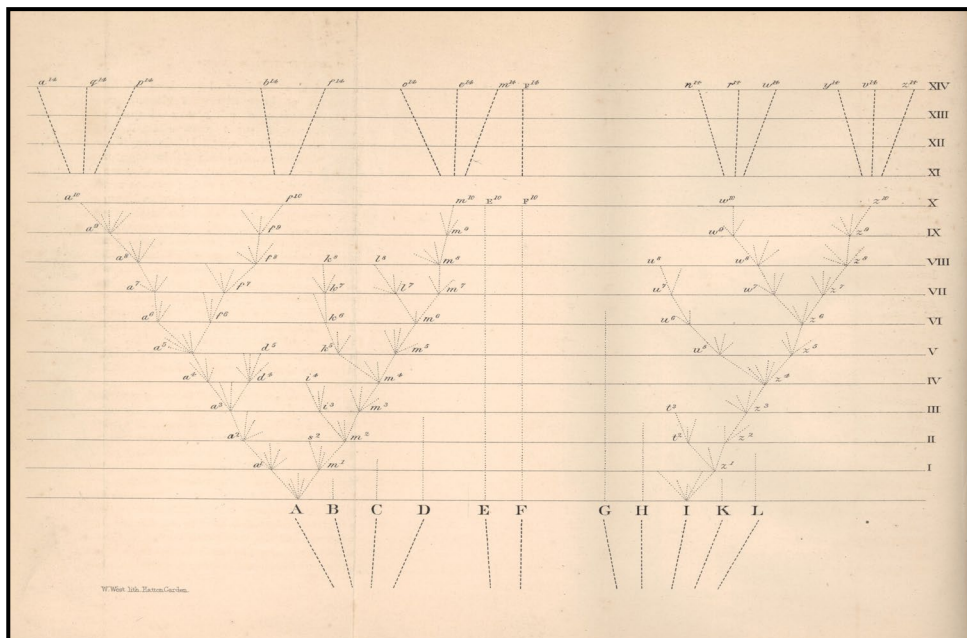
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par Fabien FERRI

*Science opérative et ingénierie sémiotique :
des machines graphiques à la morphogenèse organique*

Thèse présentée
pour l'obtention du grade
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 22 décembre 2021
Spécialité : Philosophie, Épistémologie, Histoire des Sciences et
des Techniques : Unité de recherche COSTECH (EA-2223)

D2672

Thèse présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE COMPIÈGNE

Domaine : Sciences de l'Homme et de la Société

Spécialité : Philosophie, Épistémologie, Histoire des Sciences et des Techniques

Par

Monsieur Fabien FERRI

Titre :

**SCIENCE OPÉRATIVE ET INGÉNIERIE SÉMIOLOGIQUE :
DES MACHINES GRAPHIQUES
À LA MORPHOGENÈSE ORGANIQUE**

Soutenue le 22 décembre 2021 devant le jury composé de :

M. Bruno Bachimont, Enseignant-chercheur HDR à l'Université de technologie de Compiègne, *Directeur*

Mme Laurence Dahan-Gaida, Professeure à l'Université de Franche-Comté, *Examinatrice*

Mme Maria Giulia Dondero, Directrice de Recherche au FNRS, *Examinatrice*

Mme Valeria Giardino, Chargée de Recherche au CNRS, *Examinatrice*

M. Xavier Guchet, Professeur à l'Université de technologie de Compiègne, *Examineur*

M. Jean Lassègue, Directeur de Recherche au CNRS, *Rapporteur*

M. Bruno Leclercq, Professeur ordinaire à l'Université de Liège, *Rapporteur*

M. David Rabouin, Directeur de Recherche au CNRS, *Examineur*

Ce long travail n'aurait pu être mené à son terme sans la bienveillance et la confiance de mon directeur de thèse Bruno Bachimont, professeur à l'Université de technologie de Compiègne, qui dès le début de mon projet de recherche a subtilement fait droit à ce qu'il faut bien appeler une intuition. Ce travail est le produit d'un effort de clarification d'un objet sémiotique, le diagramme, pour commencer à forger les concepts à même de légitimer le contenu de cette intuition portant sur les limites de la calculabilité et l'au-delà du calculable. Ma dette à l'égard de Bruno Bachimont est entière, car j'estime que c'est lui qui m'a fait comprendre ce qu'est la véritable philosophie. Ces remerciements sont donc pour moi le moment de lui témoigner mon admiration sincère pour son œuvre intellectuelle, sa probité et sa personne, dont j'apprécie particulièrement l'humour.

Mes remerciements vont également aux membres de mon jury, Jean Lassègue et Bruno Leclercq, qui ont accepté de rapporter mon travail, Laurence Dahan-Gaida, Maria Giulia Dondero, Valeria Giardino, Xavier Guchet et David Rabouin, qui ont accepté de l'examiner.

Que mes remerciements soient précisés : merci à Jean Lassègue, dont les travaux sur Turing ont profondément contribué à ma compréhension des rapports du calculable à l'incalculable. Merci à Bruno Leclercq, dont les travaux en logique diagrammatique m'ont permis d'approfondir ma compréhension du fonctionnement des diagrammes de Venn. Merci à Laurence Dahan-Gaida, pour sa générosité, sa disponibilité et ces moments d'échanges enthousiasmants sur la pensée diagrammatique. Merci à Maria Giulia Dondero, pour sa vivacité, son attention et sa bienveillance. Merci à Valeria Giardino, pour son attention et ses remarques avisées sur les diagrammes de nœuds. Merci à Xavier Guchet, qui a suivi l'évolution de ce projet dans toute sa progression et sa temporalité. Enfin merci à David Rabouin, qui a été présent à des étapes cruciales de la genèse de ce travail.

Je remercie le laboratoire Logiques de l'Agir, l'Université de Franche-Comté et l'Institut national supérieur du professorat et de l'éducation de l'Académie de Besançon (Inspé Besançon) pour m'avoir permis d'organiser un très grand nombre de manifestations entre 2016 et 2021. Tout d'abord une série d'ateliers doctoraux, co-organisés avec Michaël Crevoisier et Carole Widmaier en septembre 2016, octobre 2017 et octobre 2018, qui ont donné lieu à la publication de deux dossiers dans la revue Philosophique des Presses Universitaires de Franche-Comté (PUFC). Je remercie Louis Ucciani, directeur de la revue Philosophique, d'avoir accepté que des numéros de la revue soient consacrés à la publication de ces dossiers, et France Marchal-Ninosque, directrice de la collection « Annales littéraires », dans laquelle paraît la revue. Je remercie Catherine Malabou, Bruno Bachimont et Laurent Perreau pour avoir accepté de parrainer successivement ces ateliers doctoraux. Je remercie Arnaud Macé et Stefan Neuwirth d'avoir été attentifs et sensibles à mes propositions de réorganisation du séminaire de philosophie des mathématiques de Besançon à l'automne 2017 - depuis lors rebaptisé séminaire « Philosophie- Sciences cognitives-Mathématiques » (séminaire PhiCogMaths) - suivant les lignes de force de la pensée diagrammatique. Les activités liées à ce séminaire, menées au sein de la structure fédérative de recherche de l'Inspé Besançon, m'ont ainsi conduit à l'organisation d'un colloque en novembre 2019 (colloque « Ancrages matériels, imagination diagrammatique et publication encyclopédique ») et d'une journée d'études en novembre 2020 (journée d'études « Ancrages matériels II : pratiques savantes, épistémologie du design et sémiotique visuelle »). Je remercie Sarah Carvallo d'avoir accepté de publier les actes de ces manifestations scientifiques dans la collection « Sciences : concepts et problèmes » des PUFC, dont elle assure la direction.

Je remercie Laurence Dahan-Gaida, directrice du Centre de Recherches Interdisciplinaires et Transculturelles de l'Université de Franche-Comté (CRIT), et Arnaud Macé, directeur du laboratoire Logiques de l'Agir, d'avoir accepté que nous co-organisions ensemble, dans le cadre d'une collaboration entre le CRIT et le laboratoire Logiques de l'Agir, le colloque international « Forme & diagramme : problèmes de morphogenèse dans la pensée, l'art et la nature ». Je remercie Carole Widmaier de m'avoir proposé de co-organiser et de participer aux colloques « Simondon et l'analogie » (octobre 2020) et « Les puissances de l'analogie : perspectives croisées sur l'imagination inventive » (mai 2021) dans le cadre du Projet Chrysalide 2020 de l'Université de Franche-Comté « Les puissances de l'analogie », dont elle était responsable.

Je remercie aussi le laboratoire Connaissance, Organisation et Systèmes TECHniques (COSTECH) de l'Université de technologie de Compiègne (et particulièrement Serge Bouchardon, alors directeur du laboratoire, Xavier Guchet, alors référent doctoral de l'unité COSTECH, et Pierre Steiner, alors responsable de l'équipe « Recherches Cognitives et Design de l'Enaction » dans laquelle s'inscrit cette thèse) ; ainsi que le laboratoire Logiques de l'Agir, et en particulier Thierry Martin, pour avoir soutenu le financement de ma participation au Congrès mondial biennuel sur les diagrammes qui a eu lieu en juin 2018 au Centre for Algorithms Visualisation

and Evolving Systems de l'Université Napier d'Édimbourg. Merci à Lucie Lopez, pour son dévouement de traductrice et d'interprète, lors de cette conférence décisive sur le diagramme de Darwin.

Merci à Jean-Christophe Sevin, grâce à qui j'ai pu impulser une longue série d'interventions durant mes six années de thèse, en participant au Symposium Agorantic sur les humanités numériques à l'université d'Avignon en mars 2016. Merci à Paul-Émile Geoffroy, pour m'avoir invité à intervenir au Centre Pompidou en mai 2016 dans le cadre du séminaire Digital Studies de l'Institut de recherche et d'innovation. Merci à Bernard Stiegler, par-delà sa tragique disparition, pour son invitation à l'Académie d'été 2016 d'Épineuil-le-Fleuriel. Merci à mes collègues du laboratoire Logiques de l'Agir de m'avoir fait l'honneur de pouvoir présenter les résultats de mes premières excursions, dans le cadre du séminaire hebdomadaire du laboratoire bisontin, en novembre 2016. Merci à Franck Jędrzejewski de m'avoir invité dans son séminaire au Collège international de philosophie en mars 2017, ainsi qu'à un colloque international sur les diagrammes, co-organisé à Paris en janvier 2018 avec Carlos Lobo et Luciano Boi, que je tiens aussi à remercier pour leur chaleureuse invitation. Je remercie Jean-Hugues Barthélémy pour son invitation à la journée d'études « Ontologie et analogie », organisée par le Centre international des Études Simondoniennes à la MSH Paris Nord en mai 2019 ; Yannis Hausberg, pour son invitation au séminaire « Logique, Mathématiques, Informatique, Raisonnement » à l'Institut de Recherches Philosophiques de Lyon en novembre 2019 ; François Levin, pour son invitation au séminaire doctoral du laboratoire LinX de l'École Polytechnique en février 2020 ; Naïs Virenque, pour son invitation au séminaire « Qu'est-ce qu'un diagramme ? » à l'Université catholique de Louvain en octobre 2021 ; enfin Maria Giulia Dondero et Pierluigi Basso Fossali, pour leur invitation au séminaire international de sémiotique de Paris en décembre 2021.

Je souhaite remercier mes amis et collègues de la vie philosophique bisontine : Aurélien Aramini et Florian Gulli, avec qui nous échangeons depuis tant d'années maintenant ; Thierry Martin, qui a toujours soutenu mes projets et m'a toujours accordé sa confiance ; Arnaud Macé, pour son attention constante et sa curiosité intellectuelle ; mes collègues et amis Carole Widmaier, Vincent Bourdeau et Julien Pasteur ; mes collègues et amis doctorants Tristan Bonnier, Michaël Crevoisier, Ariel Guillet, Lora Mariat et Chloé Santoro.

Que soient aussi très sincèrement remerciés les amis et collègues archéologues, astronomes, biochimistes, physiciens, mathématiciens, médecins, qui ont mis au service de cette thèse leur expertise scientifique en procédant à un travail de relecture, de vérification et de correction d'un certain nombre d'analyses : Matthieu Thivet et Philippe Barral, pour leur relecture attentive de l'analyse de l'usage du diagramme stratigraphique en archéologie ; François Vernotte et Céline Reylé, pour leur relecture et leur validation de l'analyse de la fonction du diagramme de Hertzprung-Russell en astronomie ; Arnildo Kola et David Chagué, pour leur relecture de l'analyse du diagramme de Davenport ; Éric Lantz, pour sa relecture de mes propos sur les diagrammes d'influence et de chromaticité ; Jean-Marie Vigoureux, pour son accueil toujours aussi chaleureux et le temps qu'il m'a accordé à m'expliquer le fonctionnement des diagrammes de Minkowski et de Feynman (que soit aussi remercié Maxime Parolini pour nos échanges sur les diagrammes de Feynman) ; Thierry Daude, pour le temps qu'il m'a accordé à m'expliquer le fonctionnement d'un diagramme de Penrose-Carter en relativité générale ; Franck Jędrzejewski, pour sa relecture des analyses des diagrammes de Coxeter, Dynkin et Voronoï, ainsi que des diagrammes commutatifs mobilisés en théorie mathématique des catégories ; Stefan Neuwirth, pour sa relecture scrupuleuse et nos échanges sur les diagrammes de Ferrers ; Aurélien Galateau, pour sa relecture de mon analyse des diagrammes de Hasse ; enfin Jean-Jil Duchamps, pour sa sagacité et sa relecture de mes analyses des diagrammes d'influence et de De Finetti.

Que soient remerciés pour leur hospitalité chaleureuse lors de mes séjours à Compiègne et Paris : Nathalie et Frédéric, David et Élise, Maxime et Marie, Aurélien, Édouard et Marine. Merci à ma sœur et à mes parents, à ma famille et à mes amis. Mes dernières pensées vont à mes deux grands-pères.

Besançon, le 2 novembre 2021,

Fabien Ferri

TABLE DES MATIERES

Table des matières	iii
Table des figures	xvi
Avant-propos	xxiii
1. Origine de cette étude : le statut des relations intelligibles dans les théories empiristes de la connaissance	xxiii
2. Un fil conducteur : le problème du schématisme tel qu'on en hérite depuis Kant	xxix
Plan de la thèse	33

PREMIÈRE PARTIE : INGÉNIERIE SÉMIOTIQUE ET DIAGRAMMATISATION

Plan du chapitre 1	37
Chapitre 1. Introduction : intelligence artificielle & ingénierie sémiotique .38	
1. Intention générale	38
1.1 Un double constat.....	42
1.2 Diagramme : machine, modèle, instrument de calcul et outil graphique	44
2. Intelligence, intelligence artificielle et intelligence artificielle diagrammatique ..	45
2.1 Intelligence.....	45
2.2 Intelligence et intelligence artificielle.....	45
2.3 Intelligence artificielle et intelligence artificielle diagrammatique	46
3. Intelligence artificielle diagrammatique et analogisme	48
3.1 Précisions terminologiques.....	49
3.2 Principes de l'IA diagrammatique	50
3.2.1 Analogisme et modélisation des connaissances.....	50
3.2.2 Analogisme et effectivité opérationnelle.....	53
4. Un exemple : la diagrammatisation de la syllogistique	53
4.1 Algèbre symbolique et algébrisation de la logique	55
4.2 Géométrisation, algébrisation et diagrammatisation de la logique	59
Plan du chapitre 2	69

Chapitre 2. Ingénierie sémiotique et représentations infra-diagrammatiques	70
1. Intelligence artificielle réduite et ingénierie sémiotique	71
1.1 La phénoménologie de la connaissance de Peirce : un guide méthodologique	74
1.1.1 Les catégories de l'être selon Peirce	76
1.1.2 IA réduite : objet, méthode, principes	78
1.1.3 L'exemple du concept de fonction dans le cadre de la modélisation de connaissances médicales	81
1.2 Intelligence, problème et connaissances : herméneutique des supports	83
2. Processus de schématisation et catégories de représentations infra-diagrammatiques	87
2.1 Figure et schéma	88
2.1.1 Dimension spatiale du schéma	88
2.1.2 Dimension temporelle du schéma	92
2.2 Schéma et graphe	96
2.2.1 Un exemple de schéma fonctionnel : le diagramme de flux	96
2.2.2 Transformation du schéma en graphe	98
2.3 Du graphe au quasi-diagramme	100
2.3.1 Un exemple de graphe figuratif : le diagramme stratigraphique	100
2.3.2 Un exemple de graphe calculatoire : le diagramme d'influence	103
2.3.3 Représentation relationnelle dans les graphes : le diagramme commutatif	106
Bilan du chapitre 2	109
Plan du chapitre 3	110
Chapitre 3. De l'infra-diagrammatique au diagrammatique	111
1. Note liminaire	112
2. Brève histoire du concept d'opération	115
2.1 Opération et pensée antique	116
2.2 Opération et pensée moderne	119
2.3 Opération et pensée contemporaine	123
3. Des opérations géométriques aux opérations algébriques	127

3.1 Un premier exemple : l'algèbre comme opérateur de traduction entre arithmétique et géométrie.....	127
3.2 Rendre visibles les opérations	130
3.3 Deuxième exemple : le codage algébrique d'un problème d' <i>Éléments, II, 11</i>	132
3.4 Troisième exemple : le calcul de la somme des cent premiers entiers naturels par Gauss	134
4. Du calcul arithmétique au calcul numérique.....	137
4.1 De la théorie des ensembles à la crise des fondements des mathématiques	138
4.2 Une réponse à la crise des fondements : la formalisation du raisonnement dans les systèmes formels	142
4.3 L'arithmétisation du raisonnement et le théorème d'incomplétude.....	144
4.4. La mécanisation du raisonnement : la machine de Turing	146
5. De l'algorithme au diagramme	147
Bilan du chapitre 3	154

DEUXIÈME PARTIE : TYPOLOGIE DES DIAGRAMMES

Plan du chapitre 4	157
Chapitre 4. Méthodologie empirique, pseudo-diagrammes et quasi-diagrammes.....	158
1. Justification de la démarche adoptée	159
2. Catégories de composantes, classes de fonctions et classes d'objets référentiels diagrammatiques	162
2.1 Les axes	169
2.2 Les blocs	171
2.3 Les descripteurs	173
2.4 Les lignes	174
2.5 Les symboles.....	174
2.6 Les zones.....	175
3. Pseudo-diagrammes.....	176
3.1 Les représentations graphiques de données.....	176
3.1.1 Le diagramme en bâtons : un premier exemple de pseudo-diagramme	176

3.1.2 Le diagramme de Pareto : un graphique qui outille la décision	178
3.2 Les cartogrammes	181
3.2.1 Le diagramme de Hertzprung-Russell : une représentation cartogrammatique d'un tableau	181
3.2.2 Le diagramme Isotype : une carte de données qui commence à fonctionner	184
4. Quasi-diagrammes	188
4.1 Représenter des ensembles ordonnés : le diagramme de Hasse	188
4.2 Figurer des partitions : le diagramme de Ferrers	192
4.3 Géométriser des algèbres classifiées : les diagrammes de Coxeter et Dynkin	196
Bilan du chapitre 4	200
Plan du chapitre 5	201
Chapitre 5. Typologie morphologique des diagrammes	202
1. Les diagrammes ternaires	203
1.1 Les divers usages d'un diagramme ternaire	203
1.2 Exploiter un théorème de géométrie pour exprimer une loi statistique : le diagramme de De Finetti	208
2. Les diagrammes thermodynamiques	213
2.1 Diagrammes de phases et sciences des matériaux	213
2.2 C'est en diagrammant qu'on devient forgeron : le diagramme d'Ellingham	223
3. Les diagrammes d'espace-temps	230
3.1 Le diagramme de Minkowski	230
3.2 Le diagramme de Penrose-Carter	234
4. Les systèmes de notation du geste	237
4.1 Un exemple de diagramme de gestes artistiques : la cinétographie Laban .	237
4.2 Un exemple de diagramme de gestes pratiques : le mode d'emploi	243
Bilan du chapitre 5	250
Plan du chapitre 6	251
Chapitre 6. Typologie opérationnelle des diagrammes	252
1. Ingénier le sémiotique pour résoudre des problèmes techniques et vitaux	253
1.1 L'abaque de Smith	253

1.2 Le diagramme de Davenport	259
2. Dessiner des calculs pour faciliter leur pratique	264
2.1 Les diagrammes de Feynman.....	264
2.1.1 Introduction historique.....	264
2.1.2 Principes de fonctionnement de la machinerie des diagrammes de Feynman	267
2.2 Les diagrammes de Randolph	270
3. Comprendre des machines thermodynamiques.....	278
3.1 Le diagramme de Clapeyron	278
3.2 Le diagramme enthalpique.....	280
3.2.1 Présentation du diagramme enthalpique.....	280
3.2.2 Analyse d'un exemple : le diagramme enthalpique de R-134a	281
4. Machiner la théorie : le diagramme de Darwin	285
4.1 La genèse du diagramme de Darwin	286
4.2 Analyse du diagramme de <i>L'Origine des espèces</i> (1859)	293
Bilan du chapitre 6	300

TROISIÈME PARTIE : LES DIAGRAMMES ENTRE NATURE ET CULTURE

Plan du chapitre 7	303
Chapitre 7. Diagramme et histoire de la rationalité graphique	304
1. Introduction	305
2. De la raison graphique à la raison computationnelle	306
2.1 Naissance de l'écriture alphabétique et formation de la raison graphique ..	306
2.2 Généalogie de notre époque : l'esprit, la vie et la nature comme machines informationnelles	311
3. Comment et pourquoi le diagrammatique transforme-t-il l'histoire de l'écriture ?	315
3.1 Le diagramme : un objet transdisciplinaire.....	315
3.1.1 La théorie du support.....	317
3.1.2 L'anthropologie philosophique des pratiques d'écriture	319
3.1.4 La sémiotique visuelle	320

3.2 Diagramme et histoire de l'écriture : écriture alphabétique, écriture numérique et écriture diagrammatique.....	322
3.3 Le diagramme comme médium technique et graphique.....	324
3.4 Le diagramme comme expression de la distinction linguistique/graphique	326
4. Reposer le problème de la différence phénoménologique dans le contexte des diagrammes	327
4.1 La première forme canonique de notre rapport au monde : la signifiante ..	329
4.2 De la signifiante au calcul : brève histoire de la différence phénoménologique	336
5. Conclusion.....	342
Bilan du chapitre 7.....	344
Plan du chapitre 8	345
Chapitre 8. La méthode analogique	346
1. Introduction	347
1.1 La mise en forme de la méthode analogique	348
1.2 De l'analogie mathématique à l'analogie technologique.....	351
1.3 Les postulats de l'objectivisme phénoméniste.....	354
2. Ressemblance et analogie	358
2.1 La genèse de la ressemblance comme principe de méconnaissance	358
2.2 Les causes productrices de la ressemblance	360
2.3 De la sériation des ressemblances à la structuration de l'analogie.....	365
2.4 Analyse des critères de la ressemblance et de l'analogie.....	367
3. L'analogie comme méthode d'universalité.....	369
3.1 Postulat de relationnalité, image de la pensée, méthode et pratique philosophique.....	372
3.2 Examen du postulat de réflexivité	377
3.3 Conclusion	380
Bilan du chapitre 8.....	383
Plan du chapitre 9	384
Chapitre 9. Reposer le problème du schématisme dans le contexte des diagrammes.....	386
Introduction	387
1. Matérialiser le schème et dynamiser le schéma	388

1.1	Reposer le problème du schématisme à partir de Simondon.....	388
1.2	Réalisme ontologique des relations et intuition analogique	392
1.3	Ancrage matériel des schèmes et herméneutique opératoire des schémas...	394
1.4	Simplexité diagrammatique versus complexité calculatoire	399
2.	Schématisme et morphogenèse	401
2.1	Intuition diagrammatique et morphogenèse	401
2.2	Généalogie du problème du schématisme dans la modernité philosophique	402
2.3	Schématisme diagrammatique de la morphogenèse	407
2.4	Ontologie, sémio-technique et morphogenèse.....	410
2.4.1	Ontologie et sémiotique chez Peirce.....	411
2.4.2	Diagrammatiser l'opération technique.....	414
3.	Histoire de la science, connaissance analogique, philosophie de la nature et ingénierie sémiotique	418
3.1	Théorie, expérimentation, simulation, analyse de données et lecture opérationnelle	418
3.2	Pratique, imagination et forme.....	423
3.3	Iconicité, orthopraticité et isodynamisme	424
4.	Schématisme diagrammatique, philosophie de la nature et morphogenèse	427
	Bilan du chapitre 9	437
	Conclusion générale	439
	Annexe 1. Corpus de diagrammes	446
	Introduction	446
	1. Schémas.....	448
1.1	Schéma classificatoire	448
1.1.1	Diagramme de Streckeisen (<i>QAPF Diagram</i>)	448
1.2	Schémas non classificatoires.....	449
1.2.1	Diagramme de Bachman (<i>Data structure diagram</i>)	449
1.2.2	Diagramme bête à cornes	450
1.2.3	Diagramme d'Euler : voir chapitre 1, 4.2.....	452
	2. Cartes et cartogrammes	453
2.1	Diagramme d'acheminement (<i>Routing diagram</i>)	453
2.2	Diagramme de Hertzprung-Russell : voir chapitre 4, 3.2.1.....	455

2.3 Diagramme Isotype : voir chapitre 4, 3.2.2.....	455
2.4 Diagramme de Schlegel.....	455
2.5 Planning chemin de fer (<i>Time-distance diagram</i>).....	456
3. Représentations graphiques de données	457
3.1 Diagramme en bâtons : voir chapitre 4, 3.1.1.....	457
3.2 Diagramme de Lexis	457
3.3 Diagramme de Sankey	458
4. Graphes	460
4.1 Diagramme commutatif : voir chapitre 2, 2.2.3.....	460
4.2 Diagramme FAST	460
4.3 Diagramme de Ferrers : voir chapitre 4, 4.2.....	462
4.4 Diagrammes de flux (diagramme de contexte et diagramme de flux de données) : voir chapitre 2, 2.2.1	462
4.5 Diagramme de Hasse : voir chapitre 4, 4.1	462
4.6 Diagramme d'influence	462
4.7 Diagramme sagittal.....	462
4.8 Diagramme spaghetti.....	463
4.9 Diagramme stratigraphique (<i>Harris matrix</i>) : voir chapitre 2, 2.3.1	463
4.10 Diagramme de Voronoï.....	463
5. Graphiques	467
5.1 Chronogramme numérique (<i>Digital timing diagram</i>).....	467
5.2 Diagramme de bifurcation	467
5.3 Diagramme de Bode (<i>Bode plot</i>)	468
5.4 Diagramme de chromaticité.....	470
5.5 Diagramme de constellation.....	473
5.6 Diagramme d'Evans (<i>Evans diagram</i>)	474
5.7 Diagramme de Fresnel (ou représentation de Fresnel).....	475
5.8 Diagramme de Frost (<i>Frost-Ebsworth diagram</i>)	476
5.9 Diagrammes de Haigh et de Goodman	477
5.10 Diagramme horaire	478
5.11 Diagramme de Jones (<i>Jones diagram</i>).....	479
5.12 Diagramme de Moody (<i>Moody chart</i> ou <i>Moody diagram</i>)	480

5.13 Diagramme de l'œil.....	480
5.14 Diagramme de Pareto : voir chapitre 4, 3.1.2.....	481
5.15 Diagramme de Pourbaix (diagramme de potentiel-pH).....	481
5.16 Diagramme de Ramachandran.....	482
5.17 Diagramme de Wiggers (<i>Wiggers diagram</i>).....	484
6. Méthodes graphiques.....	485
6.1 Langages de modelisation graphique.....	485
6.1.1 DRAKON.....	485
6.1.2 UML (<i>Unified Modeling Language</i>).....	487
6.2 Méthodes planificatrices.....	488
6.2.1 Diagramme de cycle (simogramme).....	488
6.2.2 Diagramme d'Ishikawa.....	490
6.3 Mode d'emploi.....	491
6.3.1 L'exemple du mode d'emploi d'un autocuiseur : voir chapitre 5, 4.2... 491	
6.4 Systèmes de notation.....	491
6.4.1 Cinétographie Laban : voir chapitre 5, 4.1.....	491
6.4.2 Diagramme de Coxeter : voir chapitre 4, 4.3.....	492
6.4.3 Diagramme de Dynkin : voir chapitre 4, 4.3.....	492
6.4.4 Diagramme de nœud.....	492
7. Diagrammes.....	495
7.1 Abaque de Smith (<i>Smith chart</i> en anglais et <i>Smith-Diagramm</i> en allemand) : voir chapitre 6, 1.1.....	495
7.2 Diagramme de boucle causale (<i>Causal loop diagram</i>).....	495
7.3 Diagramme de Carroll.....	496
7.4 Diagramme de Clapeyron : voir chapitre 6, 3.1.....	499
7.5 Diagramme de Darwin : voir chapitre 6, 4.0.....	499
7.6 Diagramme de Davenport : voir chapitre 6, 1.2.....	499
7.7 Diagramme d'Ellingham : voir chapitre 5, 2.2.....	499
7.8 Diagramme enthalpique : voir chapitre 6, 3.2.....	499
7.9 Diagramme de (Bruno) De Finetti : voir chapitre 5, 1.2.....	499
7.10 Diagramme de Feynman : voir chapitre 6, 2.1.....	499
7.11 Diagramme floral.....	499

7.12 Diagramme de Jablonski.....	501
7.13 Diagramme de Minkowski : voir chapitre 5, 3.1	503
7.14 Diagramme de Penrose-Carter : chapitre 5, 3.2.....	503
7.15 Diagramme de phases : voir chapitre 5, 2.1	503
7.16 Diagramme de Randolph : voir chapitre 6, 2.2	504
7.17 Diagramme ternaire : voir chapitre 5, 1.1	504
7.18 Diagramme de Venn ; voir chapitre 1, 4.2.....	504
Sources bibliographiques et sitographiques des notices du corpus	505
Sources bibliographiques	505
Sources sitographiques	509
Annexe 2. Glossaire	517
Abaque.....	521
Affordance.....	521
Affordance représentationnelle.....	521
Algèbre.....	521
Algorithme	522
Algorithmique	522
Amplification	522
Amplification transductive.....	522
Amplification modulatrice	523
Amplification organisante	523
Analogie	523
Analogie de proportion	523
Analogie de proportionnalité.....	524
Analogie structurale.....	524
Analogie opératoire.....	524
Ancrage matériel.....	524
Atome analogique	525
Autothéticité.....	526
Axiomatique.....	526
Calcul.....	526
Carte.....	527

Cartogramme.....	527
Cartographie.....	527
Catégorie.....	527
Chaîne opératoire.....	528
Connaissance.....	528
Conscience.....	528
Cybernétique.....	529
Cycle opératoire.....	529
Démonstration.....	529
Diagrammatique.....	529
Diagrammatisation.....	529
Diagrammatologie.....	530
Diagramme.....	531
Différence phénoménologique.....	534
Dispositif.....	534
Dispositif concret.....	534
Dispositif abstrait.....	534
Dispositif discret.....	534
Encyclopédie.....	535
Figure (graphique).....	535
Format.....	535
Forme.....	535
Forme discursive.....	535
Forme esthétique.....	535
Forme opératoire.....	535
Forme organique.....	536
Forme symbolique.....	536
Formel.....	536
Formule/diagramme.....	536
Geste.....	536
Graphe.....	536
Graphique.....	537

Informatique	537
Intelligence.....	537
Intelligence artificielle	537
Lexicogramme.....	537
Lisivisibilité.....	538
Logigramme	538
Méthode	538
Méthode graphique	538
Méthode de calcul.....	538
Modalités diagrammatiques (virtuel, potentiel, actuel)	538
Modèle	541
Modulateur	541
Morphisme	541
Morphogenèse	541
Notation.....	542
Opération.....	542
Orthopraticité.....	542
Outil	543
Phénoménographie.....	543
Phénoménologie	543
Physique	543
Pictogramme.....	543
Postulat	544
Postulat de relationnalité.....	544
Postulat d’analogicité	546
Postulat de réflexivité.....	546
Preuve.....	547
Preuve informatique	547
Preuve mathématique.....	547
Preuve rhétorique	547
Principe d’équivalence fonctionnelle	547
Programme/diagramme	547

Recette/diagramme.....	548
Représentation	549
Représentation d'une opération	549
Représentation opératoire	549
Réseau/diagramme	550
Schéma/schématisation.....	550
Tableau.....	551
Technique	552
Théorie des catégories.....	552
Transduction.....	552
Vie pratique	552
Références bibliographiques et vidéographiques.....	554
Bibliographie et vidéographie des œuvres citées.....	554
Bibliographie des œuvres consultées	577
Index des noms	582
Index des diagrammes	587

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation diagrammatique systématique d'un système d'intelligence artificielle diagrammatique.....	40
Figure 2 : Schéma systématique des formes propositionnelles fondamentales (Carré logique).....	55
Figure 3 : Tableau des quatre formes fondamentales du syllogisme.....	59
Figure 4 : Expression eulérienne de la proposition « Tous les hommes sont mortels »	60
Figure 5 : Expression eulérienne des quatre formes fondamentales du syllogisme.....	60
Figure 6 : Traduction diagrammatique de l'équation universelle.....	64
Figure 7 : Matrice diagrammatique découverte par Venn.....	65
Figure 8 : Conventions interprétatives adoptées pour la lecture des diagrammes de Venn.....	66
Figure 9 : Ancrage matériel du raisonnement diagrammatique.....	67
Figure 10 : <i>L'Homme de Vitruve</i> de Léonard de Vinci.....	89
Figure 11 : Schéma du corps humain.....	90
Figure 12 : Schéma des corps de la femme et de l'homme.....	90
Figure 13 : Schéma d'une cellule végétale.....	91
Figure 14 : Carte de la France.....	92
Figure 15 : Chronophotographie.....	94
Figure 16 : Cycle 4-temps du moteur à combustion et explosion.....	95
Figure 17 : Diagramme de contexte d'un système de gestion et d'exploitation de feuilles de pointage.....	97
Figure 18 : DFD-1 d'un système de gestion et d'exploitation de feuilles de pointage.....	98
Figure 19 : Graphe non-orienté	Figure 20 : Graphe orienté
Figure 21 : Graphe des relations entre certaines composantes d'un système biologique en interaction avec un environnement qui leur est extérieur	99
Figure 22 : Règles de schématisation des relations entre unités stratigraphiques dans un diagramme stratigraphique.....	101
Figure 23 : Représentation stratigraphique d'un site de fouille.....	101
Figure 24 : Diagramme stratigraphique associé à la Figure 23.....	101
Figure 25 : Graphe de type MPM.....	102
Figure 26 : Représentation générale d'un diagramme d'influence.....	104
Figure 27 : Représentation particulière d'un diagramme d'influence.....	105
Figure 28 : Diagrammes commutatifs.....	107
Figure 29 : Un carré d'un mètre de côté, soit un mètre carré.....	127
Figure 30 : L'hypoténuse d'un triangle isocèle de côté 1 vaut $\sqrt{2}$	128

Figure 31 : Construction d'un carré d'aire 2.....	129
Figure 32 : Configuration géométrique du problème d' <i>Éléments, II, 11</i>	132
Figure 33 : Représentation diagrammatique des différents ensembles de nombres	139
Figure 34 : Théorème de Pythagore figé après son encodage algébrique....	152
Figure 35 : Preuve du théorème de Pythagore démontré par Oliver Byrne dans son édition illustrée des <i>Éléments</i> d'Euclide (1847).....	153
Figure 36 : Symétrie axiale	169
Figure 37 : Repère dans le plan	170
Figure 38 : Repère dans l'espace.....	170
Figure 39 : Diagramme en tuyaux d'orgues à deux dimensions du taux de scolarisation à 20 ans selon les pays et niveaux d'enseignement en 1996	177
Figure 40 : Tableau de données pour la construction d'un diagramme de Pareto.....	179
Figure 41 : Tableau de données réordonné pour la construction d'un diagramme de Pareto.....	180
Figure 42 : Diagramme de Pareto	180
Figure 43 : Diagramme de Hertzprung-Russell.....	183
Figure 44 : Tableau des types spectraux (classification de Harvard)	184
Figure 45 : Exemple de diagramme Isotype - Planche 74 « Mouvements migratoires de pays importants 1920-27 »	186
Figure 46 : Représentation tabulaire d'une relation binaire.....	188
Figure 47 : Représentation cartésienne d'une relation binaire.....	189
Figure 48 : Diagramme sagittal d'une relation binaire	189
Figure 49 : Matrice d'incidence d'une relation binaire	189
Figure 50 : Diagramme de Hasse d'un ensemble ordonné à 9 éléments.....	191
Figure 51 : Diagramme de Hasse de l'ensemble des diviseurs de 60.....	191
Figure 52 : Diagramme de Ferrers d'une partition.....	192
Figure 53 : Diagramme de Ferrers d'une surpartition	193
Figure 54 : Ensemble complet des diagrammes de Ferrers des partitions d'entiers jusqu'à 8	194
Figure 55 : Symétrie suivant la bissectrice du diagramme de Ferrers d'une somme d'entiers.....	195
Figure 56 : Treillis d'Young.....	196
Figure 57 : Tableau des groupes de Coxeter dans le plan euclidien et de leurs diagrammes équivalents	197
Figure 58 : Diagramme de Dynkin de l'algèbre A_2	199
Figure 59 : Diagramme de Dynkin de l'algèbre A_n	199
Figure 60 : Diagramme ternaire Or-Argent-Cuivre.....	203

Figure 61 : Diagramme ternaire Argile-Limon-Sable	204
Figure 62 : Diagramme ternaire généralisé.....	205
Figure 63 : Tableau des valeurs relatives de trois variables géographiques.....	205
Figure 64 : Sens de lecture du diagramme ternaire à trois variables	206
Figure 65 : Positionnement des observations fictives sur un diagramme ternaire.....	207
Figure 66 : Sémiotisation d'une dynamique de développement sur un diagramme ternaire.....	207
Figure 67 : Premier diagramme de De Finetti dans son premier article de 1926 publié dans la revue <i>METRON</i>	208
Figure 68 : Fondement géométrique du théorème de Viviani.....	209
Figure 69 : Expression colorimétrique du théorème de Viviani.....	210
Figure 70 : Proportions de Hardy-Weinberg pour deux allèles	211
Figure 71 : Superposition du diagramme de De Finetti avec la parabole des états en équilibre de Hardy-Weinberg.....	212
Figure 72 : Représentation d'une maille cubique à faces centrées d'arête a	214
Figure 73 : Graphique de solidification du Nickel.....	216
Figure 74 : Graphique de solidification du Cuivre.....	217
Figure 75 : Graphique de solidification de l'alliage binaire Cu-Ni	217
Figure 76 : Diagramme de phases de l'alliage binaire Cu-Ni.....	218
Figure 77 : Représentation généralisée du diagramme de phases.....	220
Figure 78 : Diagramme de répartition des concentrations en fonction des phases	221
Figure 79 : Description du diagramme de répartition des concentrations en fonction des phases.....	223
Figure 80 : Droite d'Ellingham.....	224
Figure 81 : Différenciation des zones d'existence d'un métal et d'un oxyde	226
Figure 82 : Diagramme d'Ellingham pour l'oxydation.....	227
Figure 83 : Puissance déductive du diagramme d'Ellingham	228
Figure 84 : Diagramme d'Ellingham donnant l'enthalpie libre standard de réaction de quelques réactions d'oxydation par le dioxygène.....	229
Figure 85 : Diagramme de Minkowski d'un référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel.....	230
Figure 86 : Diagramme de Minkowski.....	232
Figure 87 : Transformation de Lorentz	232
Figure 88 : Représentation dans l'espace d'un espace-temps de Minkowski compactifié.....	234

Figure 89 : Représentation dans le plan d'un espace-temps de Minkowski compactifié par un diagramme de Penrose-Carter.....	235
Figure 90 : Diagramme de Penrose-Carter représentant l'horizon d'un trou noir.....	236
Figure 91 : Portée vide d'une partition chorégraphique en notation Laban	238
Figure 92 : Organisation de l'espace d'inscription d'une portée en notation Laban	239
Figure 93 : Système de notation des parties du corps en cinétophographie Laban	240
Figure 94 : Signes de directions des gestes en notation Laban	240
Figure 95 : Code couleurs de la notation Laban.....	241
Figure 96 : Exemple de portée en cinétophographie Laban.....	241
Figure 97 : Traduction de la portée de la Figure 96	242
Figure 98 : Mode d'emploi formaté en texte non fragmenté.....	245
Figure 99 : Mode d'emploi formaté en texte fragmenté.....	246
Figure 100 : Mode d'emploi formaté en illustration non fragmentée.....	246
Figure 101 : Mode d'emploi formaté en illustration fragmentée.....	247
Figure 102 : Mode d'emploi formaté en texte et illustration non fragmentés	248
Figure 103 : Mode d'emploi formaté en texte et illustration fragmentés ...	249
Figure 104 : Roue de résistance de l'abaque de Smith.....	254
Figure 105 : Roue de réactance de l'abaque de Smith.....	255
Figure 106 : Abaque de Smith.....	257
Figure 107 : Diagramme de Davenport	263
Figure 108 : Premier diagramme de Feynman	266
Figure 109 : Diagramme de l'interaction entre deux atomes neutres A et B par échange de photons	267
Figure 110 : Diagramme de Feynman de l'interaction entre deux atomes neutres par échange de photons.....	269
Figure 111 : Expression analytique des diagrammes de Feynman des Figures 109 et 110.....	269
Figure 112 : Diagramme de Venn des relations entre 5 ensembles.....	270
Figure 113 : Représentation équivalente de la Figure 112 au moyen d'un R-diagramme.....	270
Figure 114 : Division de l'ensemble universel U en deux parties disjointes.....	271
Figure 115 : Division de l'ensemble universel U en quatre parties disjointes	272
Figure 116 : Première convention graphique de Randolph.....	272
Figure 117 : Deuxième convention graphique de Randolph	273

Figure 118 : Séquence de traduction d'un diagramme de Venn en R-diagramme.....	273
Figure 119 : R-diagramme de l'union $A \cup B$	274
Figure 120 : R-diagramme de l'union $(A \cup B)'$	274
Figure 121 : Traduction de $A' \cup B \cup (A \cap B)$ sous forme d'un R-diagramme.....	274
Figure 122 : Règle d'intersection de R-diagrammes	275
Figure 123 : Exemple de simplification calculatoire au moyen de R-diagrammes	275
Figure 124 : Tableau des opérations logiques de base.....	276
Figure 125 : Schéma d'un compresseur	278
Figure 126 : Diagramme de Clapeyron.....	279
Figure 127 : Description du diagramme enthalpique.....	281
Figure 128 : Schéma d'un climatiseur.....	282
Figure 129 : Diagramme enthalpique de R-134a	284
Figure 130 : Charles Darwin, <i>Amphiroa Orbignyana</i> , 1770, Londres, The Natural History Museum	287
Figure 131 : Analyse d'une reproduction schématique de la première esquisse du diagramme de Darwin (1837) tirée du <i>Carnet B</i> , folio 26.....	288
Figure 132 : Description de la « Carte des affinités naturelles de la classe des oiseaux » (<i>Chart of the Natural Affinities of the Class of Birds</i>) de Hugh E. Strickland (1843)	289
Figure 133 : Description du frontispice des <i>Outlines of Comparative Physiology</i> de J. L. R. Agassiz (1851)	290
Figure 134 : Description de la structure des esquisses de Darwin (1851-1857)	291
Figure 135 : Le diagramme comme cryptogramme : figuration de la thèse de Bredekamp à propos du diagramme de Darwin.....	292
Figure 136 : Version finale du diagramme de Darwin (1859).....	293
Figure 137 : Annotation personnelle du diagramme de Darwin	299
Figure 138 : Schéma simplifié d'une théorie générale des opérations équivalentes	353
Figure 139 : Schéma d'une sonnette électrique	362
Figure 140 : Horloge électrique.....	363
Figure 141 : Horloge à poids.....	363
Figure 142 : Treuil à roue	364
Figure 143 : Diagramme QAPF simplifié des roches plutoniques	448
Figure 144 : Diagramme de Bachman	449
Figure 145 : Diagramme bête à cornes	451
Figure 146 : Diagramme d'acheminement en perspective, par Charles Day	453

Figure 147 : Diagramme d'acheminement, par Charles Day	454
Figure 148 : Diagrammes de Schlegel des cinq solides platoniciens	455
Figure 149 : Planning chemin de fer pour la construction d'une autoroute	456
Figure 150 : Diagramme de Lexis	458
Figure 151 : Diagramme de Sankey du bilan énergétique des États-Unis en 2015	459
Figure 152 : Diagramme FAST d'un aspirateur	461
Figure 153 : Diagramme sagittal de l'injection de l'ensemble A dans l'ensemble B.....	462
Figure 154 : Diagramme spaghetti des trajets des composants d'un produit lors de leur assemblage pour sa production.....	463
Figure 155 : Diagramme de Voronoï.....	464
Figure 156 : Arêtes de Voronoï.....	465
Figure 157 : Sommet de Voronoï.....	465
Figure 158 : Chronogramme des différentes configurations d'horloge d'une liaison SPI (<i>Serial Peripheral Interface</i>)	467
Figure 159 : Diagramme de bifurcation.....	468
Figure 160 : Diagramme de Bode	469
Figure 161 : Diagramme de chromaticité 1	470
Figure 162 : Domaines du spectre électromagnétique.....	471
Figure 163 : Triangle de Maxwell inscrit dans le diagramme de chromaticité	472
Figure 164 : Diagramme de chromaticité 2	473
Figure 165 : Points de constellation dans le plan (I, Q).....	474
Figure 166 : Représentation d'un signal en coordonnées polaires	474
Figure 167 : Diagramme d'Evans.....	475
Figure 168 : Diagramme de Fresnel associé à un circuit RLC (résistance + bobine + condensateur).....	475
Figure 169 : Diagramme de Frost du Chlore en solutions acide (pH = 0) et basique (pH = 14).....	476
Figure 170 : Diagrammes de Haigh et Goodman	477
Figure 171 : Diagramme horaire de la vitesse d'un parachutiste	478
Figure 172 : Diagramme de Jones	479
Figure 173 : Diagramme de Moody.....	480
Figure 174 : Diagramme de l'œil d'un signal à quatre niveaux.....	481
Figure 175 : Diagramme de Pourbaix du Fer	482
Figure 176 : Angles dièdres φ et ψ dans une chaîne d'acides aminés.....	483
Figure 177 : Diagramme de Ramachandran d'une protéine	483

Figure 178 : Diagramme de Wiggers des événements du cycle cardiaque se produisant dans le ventricule gauche.....	484
Figure 179 : Icônes et macro-icônes du langage DRAKON.....	485
Figure 180 : Algorithme drakon de sortie d'appartement.....	487
Figure 181 : Diagramme de cycle d'une Zone d'Assemblage de Production	489
Figure 182 : Diagramme de cycle après rééquilibrage.....	489
Figure 183 : Diagramme d'Ishikawa 5M.....	490
Figure 184 : Diagramme d'Ishikawa 7M.....	491
Figure 185 : Diagramme et nœud associé de Type I.....	493
Figure 186 : Diagramme et nœud associé de Type II.....	493
Figure 187 : Diagramme et nœud associé de Type III.....	493
Figure 188 : Diagramme de boucle causale montrant une rétroaction de renforcement entre un solde bancaire et des intérêts perçus.....	495
Figure 189 : Structure générale d'un diagramme bilittéral.....	496
Figure 190 : Série des diagrammes bilittéraux associés à quatre classes d'attribution.....	497
Figure 191 : Diagramme trilittéral.....	498
Figure 192 : Représentation de la conclusion d'un syllogisme au moyen d'un diagramme bilittéral.....	499
Figure 193 : Diagramme floral de l'Arabette des dames.....	500
Figure 194 : Représentation de la relation du matériel végétal de la Campanule carillon à son diagramme floral.....	500
Figure 195 : Diagramme de Jablonski représentant les phénomènes d'absorption, de relaxation vibratoire et de fluorescence dans une molécule	502
Figure 196 : Diagramme de Jablonski représentant le phénomène de conversion intersystème.....	503

AVANT-PROPOS

1. Origine de cette étude : le statut des relations intelligibles dans les théories empiristes de la connaissance

Ce travail s'enracine dans une réflexion qui portait originellement sur le problème de la construction d'une science de l'homme et d'une anthropologie philosophique au 18^e siècle dans le système de pensée de David Hume¹. Comment l'esprit devient-il un sujet ? La réponse donnée à l'issue de cette première enquête fut la suivante : l'esprit devient un sujet d'une part en poursuivant des fins d'après des principes d'utilité et de plaisir (sujet pratique) ; d'autre part en établissant des relations entre des idées sous l'effet de principes d'association (sujet théorique). Dès lors, il nous est apparu que la doctrine des relations chez Hume se présente comme une psychosociologie dynamique à trois étages formée d'une part d'un réseau de relations d'idées au niveau du système de l'entendement humain, d'autre part d'un système des passions qui l'investit pour lui donner un sens et une direction dans l'histoire ; ces deux systèmes s'objectivant historiquement à travers une société de l'invention et de l'artifice politico-juridique dont la finalité est de réguler une nature humaine à la fois intelligente et passionnelle.

La seconde conclusion à laquelle nous étions parvenus, c'est que la thèse, soutenue par Gilles Deleuze², selon laquelle les relations sont extérieures aux idées qu'elles réunissent, est invalidée par une analyse approfondie du statut de la relation de ressemblance. Car l'ordre qualitatif des ressemblances peut être déterminé par l'ordre quantitatif des équivalences des charges émotionnelles enveloppées dans les impressions vécues par le sujet pathologique³. La conséquence de ce constat était la suivante : la

¹ F. Ferri, *Le statut des relations chez Hume*, mémoire de master 1 en philosophie sous la direction de F. Brahami, Besançon, Université de Franche-Comté, 2009.

² G. Deleuze, *Empirisme et subjectivité : essai sur la nature humaine selon Hume*, Paris, Presses universitaires de France, 1953.

³ F. Brahami, *Introduction au Traité de la nature humaine de David Hume*, Paris, Presses universitaires de France, 2003, p. 55-58.

relation de ressemblance est sentie, donc objet d'expérience. Ce qui nous ouvrait la voie pour une exploration de l'empirisme radical de William James, pour lequel les relations, comme les expériences qu'elles relient, font l'objet d'expériences⁴.

Il s'agissait alors de comprendre pourquoi W. James affirmait et démontrait jusqu'à un certain point, à partir de son travail de psychologue expérimental, que l'empirisme radical se tient, que nous faisons bien une expérience des relations qui tissent nos expériences et que nous les transformons en contextures associatives psychiques qui nous servent de cartes conceptuelles, nous permettent de nous orienter dans le monde et de nous guider dans l'action⁵. Ainsi, du problème de l'action des principes d'association d'idées dans l'empirisme sceptique de Hume, nous en sommes arrivés à la possibilité de de l'expérience des liaisons associatives réelles dans l'empirisme radical et le pragmatisme de James. De la possibilité de leur expérience, nous en sommes naturellement arrivés à la question de la teneur ontologique de la relation comme condition de l'expérience réelle, c'est-à-dire à la question de sa valeur d'être. Invisible, inassignable mais pourtant bien réelle, la relation est ce qui, comme information première, c'est-à-dire différence de potentiel physique, tension interne psychique ou encore incompatibilité ressentie dans une situation problématique, rend possible l'actualisation d'un potentiel physique ou d'un virtuel psychique à l'issue d'une réorganisation des données d'un problème concret. Par « information première », nous entendons un « terrain pré-réflexif⁶ » à partir duquel une conscience réfléchissante peut définir l'existence d'un problème.

La différence ontologique, entendue comme point de départ de la réflexion philosophique, n'est pas la différence entre l'être et l'étant, ce n'est pas non plus la différence phénoménologique entre l'être comme signification et l'être comme mesure, c'est la différence du spontané et du réflexif. Le spontané peut être défini en première

⁴ W. James, *Essais d'empirisme radical*, Paris, Flammarion, 2007.

⁵ F. Ferri, *Sensibilité, liberté, nouveauté : essai sur le statut de l'expérience selon James*, mémoire de master 2 en philosophie sous la direction de F. Brahami, Besançon, Université de Franche-Comté, 2010.

⁶ G. Simondon, « Point de méthode », in N. Simondon et I. Saurin (éd.), *Sur la philosophie*, Paris, Presses universitaires de France, 2016, p. 27.

analyse comme l'opération du réel qui excède et précède la réflexion, l'initie et la force. Cette spontanéité, pour constituer le terrain d'une réflexion philosophique valable, doit être affectée d'un caractère problématique. Le retour aux choses mêmes, mot d'ordre de la phénoménologie, est en vérité le retour à la spontanéité d'un réel qui nous excède, mais qui est actuel : c'est la saisie du monde dans son *actualité*. Mais la spontanéité seule ne suffit pas : tout donné de la conscience est dans une certaine mesure matière à spontanéité. La valabilité d'un donné spontané lui vient de son caractère problématique (car la solution du problème sera source de valeur nouvelle). Ce donné doit avoir le caractère d'un fait : il doit être objectif, constatable par une pluralité de consciences, car reconnu intersubjectivement. La valabilité d'un donné lui vient donc de son objectivité problématique, reconnue par une communauté d'individus vivant dans le même monde et se pensant comme vivant dans la même actualité. Mais l'objectivité problématique d'un donné ne franchit pas toujours le seuil de l'expression. Elle peut rester implicite, bien que vécue. Pour franchir le seuil de la pensée philosophique, elle doit donc être exprimée, c'est-à-dire formulée. La formulation est la position explicite du problème, qui permet sa reconnaissance intersubjective, et son traitement collectif. L'induction opérée par la reconnaissance intersubjective est ce qui élève le caractère problématique du donné (qui peut être vécu par des consciences séparées) au statut de problème objectif, propulsant ainsi la conscience préreflexive dans l'ordre réflexif : la médiation intersubjective crée la conscience réflexive des individus.

Or le discours philosophique sur l'être qui s'enracine explicitement dans le postulat selon lequel *la relation a valeur d'être*, formulé à titre d'hypothèse valable selon nous puisque fondé sur les données épistémologiques de la science de son temps (qui est encore à bien des égards le nôtre), c'est celui qui a été élaboré par Gilbert Simondon à travers la théorie générale des processus d'individuation exposée dans sa thèse principale⁷. Cette

⁷ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (1958), Grenoble, Jérôme Millon, 2013.

ontologie, que Simondon appelait d'ailleurs « ontogénèse », dans un geste ayant révélé un impensé de l'histoire de la métaphysique (la relation) et un déni de l'histoire de la philosophie (l'opération technique), est le résultat d'une enquête ayant procédé, grâce à une attention à la vie, à une sensibilité au mode d'existence des objets techniques et à une connaissance de la science de son temps⁸ (thermodynamique des états loin de l'équilibre, physique quantique, psychologie de la forme, cybernétique, théorie de l'information, etc.) à la mise au jour des conditions d'avènement de la réalité individuée suivant différents modes (physique, vital, psychosocial) et à différentes échelles (micro, méso et macroscopique).

C'est pourquoi, dans le cadre de cette thèse, nous traitons de l'activité immanente à la relation en tant qu'elle est condition d'individuation (dimension ontologique de l'enquête), condition d'invention (dimension technique de l'enquête) et enfin condition d'intervention et de manipulation (dimensions pratique et scientifique de l'enquête), activité que nous nommons *opération*. Toute la difficulté pour caractériser ontologiquement la notion d'opération vient du fait qu'elle désigne toujours une incidence d'information, comme dans l'exemple paradigmatique du germe cristallin qui entre en contact avec une solution sursaturée pour donner naissance à la formation d'un cristal. L'opération, comprise ainsi comme moment où se produit un couplage structurel entre une *information première* comprise comme ensemble de potentiels pouvant s'actualiser dans une série de transformations et l'*information seconde* comprise comme germe cristallin pouvant constituer une amorce de transformation du fait de la rencontre entre ordres de réalités qui s'appareillent, est donc aussi une opération de communication, puisque c'est cette communication qui rend possible l'actualisation progressive des potentiels sollicités jusqu'à leur épuisement. C'est du couplage structurel entre une

⁸ Dans le premier chapitre de son ouvrage *Simondon ou l'encyclopédisme génétique* (Paris, Presses universitaires de France, 2008), J.-H. Barthélémy a mis au jour les grandes sources philosophiques (Bergson, Bachelard, Canguilhem) et les paradigmes physiques (issus de la thermodynamique, de la physique relativiste et de la physique quantique) dont est issue l'ontologie simondonienne.

information première et une information seconde que procède un processus d'individuation, entendu comme information conduisant à une prise de forme et à sa stabilisation progressive⁹.

Notre objet d'étude est cette réalité principielle non substantielle mais relationnelle nommée opération, en tant qu'elle individue, invente et contrôle, et telle qu'elle peut sémiotiquement être capturée par cette classe de signes que sont les *diagrammes*¹⁰. Car les diagrammes sont selon nous des formes techniques et graphiques, c'est-à-dire sémiotiques, qui manifestent concrètement les opérations réelles telles qu'elles impactent les structures de l'être dans le cours d'un devenir transformateur. Dans cette perspective, nous cherchons donc à articuler une métaphysique qui nous est contemporaine (la théorie générale des processus d'individuation dont nous héritons de Simondon) à une théorie générale des signes qui excède les systèmes de représentations linguistiques (la sémiotique diagrammatique dont nous héritons de Peirce).

Ainsi, il s'agit d'explicitier, dans le sillage des travaux de Simondon, non seulement en quoi et comment l'opération est principe d'individuation des êtres, mais aussi à quelles conditions une opération peut devenir un principe de la connaissance elle-même, comment elle peut être enregistrée sur un support, afin d'être conservée, transportée et transmise

⁹ Alors que Simondon vient de commencer à préparer sa thèse (qu'il soutiendra le 19 avril 1958), M. Heidegger prononce en 1953 une conférence à Munich, intitulée « Science et méditation », qui sera publiée en 1954 et traduite en français en 1958, dans laquelle il reconnaît explicitement le primat ontologique de la relation dans le mode de saisie de la Nature par la physique contemporaine : « Nous appelons maintenant objectivité (*Gegenständlichkeit*) le mode de présence de cette chose présente qui apparaît comme objet à l'époque moderne. (...) Dans la phase la plus récente de la physique atomique, l'objet lui-même disparaît (...) et c'est ainsi avant tout la relation sujet-objet en tant que pure relation qui prend le pas sur l'objet et le sujet et dont il faut s'assurer comme d'un fonds. (...) La relation sujet-objet réalise ainsi, pour la première fois, son pur caractère de "relation" » (M. Heidegger, « Science et méditation », *Essais et conférences*, Paris, Gallimard-Tel, p. 68).

¹⁰ C. S. Peirce (1839-1914), père de la science des signes ou sémiotique, classe les signes en trois grandes catégories : indice, icône, symbole. Au sein de la catégorie de l'icône, il distingue l'image et le diagramme. Le diagramme, sous-catégorie de l'icône, est une figure abstraite puisqu'il consiste à représenter la forme d'une chose, c'est-à-dire sa structure, au moyen d'une structure notationnelle médiate isomorphe à cette forme, qui entretient donc avec cette forme première une relation d'analogie structurale. C'est pourquoi Peirce définit le diagramme comme une « icône de relations intelligibles ». Cf. Peirce, *Collected Papers*, 4.531.

pour être réactualisée dans une histoire évolutive et cumulative. Autrement dit, il s'agit d'explicitier en quoi le diagramme est le support d'inscription d'opérations transmissibles et réactualisables.

L'opération comme principe est donc inséparable de l'institution d'une communication matérielle à l'origine d'une transformation. Or si l'opération est inséparable de l'institution d'une communication, c'est-à-dire d'un contact, alors il faut interroger la notion d'information dans son rapport à celle d'opération. Ces notions (information et opération) nous semblent cardinales car nous pensons qu'elles ont valeur de principes, bien qu'elles soient relationnelles. Éclaircir leur intimité jetterait de nouvelles lumières sur ce que veut dire résoudre effectivement un problème dans l'être (enjeu ontologique) et sur la nature de la causalité (enjeux épistémologique et scientifique), à partir du moment où l'on prend au sérieux l'aléa, puisque celui-ci peut provoquer une incidence d'information déclenchant une série de transformations dans le devenir¹¹.

Réinterroger ces deux notions, en expliciter le contenu pour en faire des concepts unifiés au sein d'une théorie consistante de l'être, tel est un des objectifs que veut initier cette thèse. Une *théorie de l'information* doit en effet permettre de rendre compte de la structuration progressive de milieux à travers des processus d'amplification¹² donnant naissance à des formes plus ou moins stables dans le temps, telles que des amplifications transductives donnant naissance à des feux, des amplifications modulatrices donnant

¹¹ B. Morizot a interrogé dans sa thèse l'impact du hasard dans le processus d'individuation tel qu'il est théorisé par Simondon. En tant qu'il caractérise dans l'individuation la modalité de la rencontre entre l'opération d'information, donnant forme à l'individu, et le milieu métastable dont est porteur cet individu et qui le rend potentiellement transformable dans le cours de son devenir, le hasard permet de penser l'invention dans une perspective morphogénétique. Pensée comme invention, Morizot montre que l'individuation peut être analysable, en reprenant le concept à S. J. Gould, en termes d'« exaptations » indéfinies, c'est-à-dire d'activités de bricolage du vivant qui re-fonctionnalise des structures morphologiques ou cognitives originellement non pré-adaptées aux buts qui sont réassignés à ces structures. Voir : B. Morizot, *Pour une théorie de la rencontre : hasard et individuation chez Gilbert Simondon*, Paris, J. Vrin, 2016.

¹² G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, Chatou, La Transparence, 2010, p. 159-176.

naissance à des phénomènes de régulation comme en témoigne par exemple l'actualisation progressive d'une force dans un travail moteur, ou encore des amplifications « organisantes » donnant naissance, par adaptation et invention, à de nouvelles fonctions vivantes ou techniques. Un *schématisme de l'opération* doit quant à lui permettre de rendre compte de la morphogenèse comme production de formes non seulement structurées (par rapport à des seuils critiques) mais aussi significatives (par rapport à des situations problématiques) du point de vue d'un sujet connaissant et agissant, sémiotiquement informé et constamment en apprentissage dans le devenir de son être.

2. Un fil conducteur : le problème du schématisme tel qu'on en hérite depuis Kant

Un des fils conducteurs de notre problématique est la question du schématisme, c'est-à-dire celle de l'articulation entre ce que Kant appelait les catégories de l'entendement (principes des liaisons intelligibles) et le divers de l'intuition donné dans l'expérience (diversité des impressions senties) pour constituer ce divers en objet de connaissance (contenu synthétisé porteur de sens)¹³. Constitution du sujet d'après des principes qui lui sont extérieurs, catégories de l'entendement organisant un divers de l'expérience en une unité objective pouvant faire l'objet d'une connaissance (qui devient alors une ressource pour le sujet dans le cadre d'une conduite finalisée), cela renvoie à un problème, celui de la synthèse des contenus de connaissance, donc à celui de la méthode de production de cette synthèse, c'est-à-dire aux règles d'enchaînement temporel permettant d'opérer cette synthèse et de produire ces contenus, d'une part de façon phénoménologique (en tant qu'ils sont signifiants pour des consciences), ensuite de façon sémiotique (en tant qu'ils deviennent appropriables et manipulables par des agents communiquant), enfin d'une

¹³ La théorie kantienne du schématisme se trouve exposée dans : E. Kant, « Du schématisme des concepts purs de l'entendement », *Critique de la raison pure*, Paris, Flammarion, 2001, p. 224-230.

manière objectivée (en tant qu'ils deviennent partageables, intersubjectifs, reproductibles et interprétables par une communauté d'individus parlant).

Si la connaissance est ce qui s'opère comme synthèse de la pensée (catégories du jugement) et de l'expérience (divers sensible), quel est le principe de cette synthèse ? Si une expérience de l'opération et une pensée de l'opération sont possibles, alors une connaissance de l'opération doit aussi être possible, comme synthèse de deux opérations convergentes. Mais une telle connaissance doit elle-même procéder d'une opération non thématifiée par le sujet connaissant, la synthèse en tant que telle, qui reste dans l'ombre, et nous tombons alors dans le piège d'une régression à l'infini. Pour échapper à cette régression, on doit donc supposer que la synthèse de l'opération est contemporaine de l'expérience de l'opération et de la pensée de cette opération. La connaissance de l'opération devient alors contemporaine d'une triple opération : opération de l'expérience, opération de la pensée, opération de leur synthèse. Cette longue quête de l'opération est celle qui, de l'individuation d'une subjectivité isolée, conduit à la « co-individuation » de plusieurs sujets et enfin à la « transindividuation » intergénérationnelle, dont l'enregistrement à travers des artefacts sémiotiques permet la conservation de significations au-delà de la finitude existentielle des êtres mortels qui les ont produites¹⁴. Tout l'enjeu de la sténographie diagrammatique devient alors de capter l'opération pour l'enregistrer et en garder la trace, pour rendre possible la reproduction du mécanisme de la synthèse à travers des règles de réécriture garantes de l'universalité des formes produites. D'où naît ce besoin ? De la finitude de la mémoire et de l'existence humaines.

Le contenu de connaissance produit par cette synthèse de l'intelligence, comme réalité une et individuée, soumise à des conditions d'avènement et de stabilité structurelle au sein d'une nature, aux différents ordres de grandeur de la réalité, est ce que la métaphysique et l'épistémologie de Simondon ont pensé comme *individu*, l'individu étant toujours produit comme une résolution de tensions au sein d'une objectivité

¹⁴ B. Stiegler, *Prendre soin : de la jeunesse et des générations*, Paris, Flammarion, 2008, p. 39.

problématique, comme l'institution d'une communication entre des ordres de grandeur séparés par leurs différences d'échelles, l'individu faisant communiquer le plus grand et le plus petit que soi, par l'intermédiaire d'un processus médiat d'amplification, qui maintient une cohésion grâce à une rétention d'information, source de tension structurante au sein de l'être vivant.

PLAN DE LA THESE

Cette thèse comprend trois parties formées de trois chapitres chacune : la première est problématique, la seconde est analytique, la troisième est programmatique. La première partie présente le cadre théorique de l'ingénierie sémiotique. Les trois premiers chapitres sont consacrés à sa problématique, à son héritage et à son articulation à la problématique des représentations diagrammatiques. Le chapitre 1, introductif, porte sur la problématique de l'ingénierie sémiotique en tant que telle et justifie son lien avec la problématique diagrammatique à travers l'analyse d'un exemple simple mais non trivial, la diagrammatisation de la syllogistique. Il a pour fonction de commencer à argumenter l'une de thèses centrales de notre étude selon laquelle *un diagramme est une machine sémiotique*. Le deuxième chapitre expose le cadre méthodologique et la position matérialiste de l'ingénierie sémiotique (la sémiotique peircienne et la théorie du support) et caractérise trois catégories de représentations infra-diagrammatiques (la figure, le schéma et le graphe) à travers quelques études de cas d'outils graphiques (le diagramme de flux, le diagramme stratigraphique, le diagramme d'influence) ainsi qu'un premier cas de pseudo-diagramme (le diagramme commutatif en théorie des catégories). Le chapitre 3 propose une analyse historique et génétique de la pensée opératoire, conduisant à la représentation algorithmique, que nous caractérisons comme constituant le versant calculable d'une représentation diagrammatique. Ce chapitre a pour fonction de conduire une analyse dont le résultat contraint à devoir reconnaître que la représentation diagrammatique est irréductible à la représentation algorithmique. Pour cette raison, la représentation diagrammatique est porteuse d'un supplément d'intelligibilité d'ordre sémiotique qu'il faut caractériser.

C'est ce à quoi s'attèle la deuxième partie de ce travail, en proposant des analyses de diagrammes dans divers champs du savoir, qu'ils soient théoriques ou appliqués, pratiques, scientifiques ou artistiques. Le chapitre 4 justifie la méthodologie empirique adoptée au sein de cette étude, qui nous a permis de déterminer un corpus de

diagrammes. Il présente les six catégories de composantes dont sont constitués les diagrammes selon nous, leurs diverses fonctions en tant que représentations graphiques ainsi que les types d'objets auxquels ils se réfèrent en tant que systèmes de signes tenant lieu d'autres choses que d'eux-mêmes. Après avoir analysé quelques cas de pseudo-diagrammes (les représentations graphiques de données et les cartogrammes) et de quasi-diagrammes (diagramme de Hasse, diagramme de Ferrers et diagrammes de Coxeter et Dynkin), nous proposons deux typologies des diagrammes : la première, morphologique, la seconde, opérationnelle. Le chapitre 5 expose notre typologie morphologique, que nous déclinons en quatre types : les diagrammes ternaires, les diagrammes thermodynamiques, les diagrammes d'espace-temps et les systèmes de notation du geste. Le chapitre 6 expose notre typologie opérationnelle, que nous déclinons en cinq grandes fonctions pratiques : proposer des outils graphiques de résolution de problèmes techniques et vitaux, faciliter la pratique de certains calculs, comprendre des machines thermodynamiques et enfin machiner une théorie scientifique. Nous justifions cette typologie à travers des analyses de cas (abaque de Smith, diagramme de Davenport, diagramme de Feynman, diagramme de Randolph, diagramme de Clapeyron, diagramme enthalpique et diagramme de Darwin).

En réinscrivant les diagrammes dans une histoire de la technique sur le long cours, nous montrons dans le chapitre 7 qu'ils ouvrent un nouveau chapitre de l'histoire de l'écriture, et apparaissent comme des technologies intellectuelles constitutives de nouvelles manières de penser et d'outiller la pensée. De même, en réinscrivant le raisonnement analogique dans une longue histoire de la science et de la technique, nous argumentons dans le chapitre 8 afin de réhabiliter la méthode de pensée analogique comme constituant une démarche rationnelle et valable, dès lors qu'elle s'exerce sous certaines conditions et dans certaines limites. Enfin, dans le neuvième et dernier chapitre, nous soutenons qu'il est possible de reposer le problème du schématisme dans une perspective matérialiste et diagrammatique, en montrant que le schème ne peut plus être

considéré comme un mystère enfoui dans les profondeurs de la conscience, mais doit être matérialisé dans un support qui permet de le déployer comme schéma visible dont la saisie l'opérationnalise sous forme de diagramme. Autrement dit, il y a une performativité inhérente au diagramme, qui n'existe que comme exécution, lorsque le schéma est interprété et animé par le geste qui s'en empare à travers un support de savoir matériel, fini et manipulable. Il y a donc une analogie entre les couples schéma/diagramme et algorithme/calcul que nous souhaitons interroger et explorer. En effet, le schéma et l'algorithme sont des représentations, tandis que le diagramme et le calcul sont des réalités temporelles, c'est-à-dire des exécutions effectives. Ce qui est en jeu, c'est la question de l'invention : penser diagrammatiquement, c'est-à-dire agir, ne serait-ce pas actualiser analogiquement les schèmes opératoires dont sont porteurs les schémas ? En argumentant en faveur de la thèse selon laquelle le diagramme est un dispositif sémiotique au cœur du vivant, nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un outil pertinent pour comprendre les processus de morphogenèse dans le cadre d'une philosophie de la nature.

**PREMIERE PARTIE : INGENIERIE SEMIOTIQUE ET
DIAGRAMMATISATION**

PLAN DU CHAPITRE 1

L'objectif de ce chapitre d'introduction est de définir le cadre général du programme de recherche dans lequel s'inscrit notre étude et le lien de filiation qui le rattache au programme de l'« artéfacture » de Bruno Bachimont, c'est-à-dire à la critique du formalisme en intelligence artificielle qu'autorisent les résultats de l'ingénierie des connaissances conçue comme une technologie cognitive qui instrumente la résolution de problèmes effectuée par des êtres humains, via la médiation des artéfacts informatiques. Le programme de l'ingénierie sémiotique est la poursuite du programme de l'artéfacture, à travers :

- l'étude des propriétés d'une classe de représentations graphiques, les diagrammes, que nous définissons comme des machines sémiotiques semi-computationnelles ;
- l'étude des conséquences cognitives de leur manipulation.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION : INTELLIGENCE ARTIFICIELLE & INGENIERIE SEMIOTIQUE

1. Intention générale

Le but de cette thèse est de proposer une approche diagrammatique de l'intelligence artificielle (IA), premièrement en rapportant l'expression langagière d'un problème pratique à des formes graphiques assemblées pour coder l'énoncé du problème à traiter ; deuxièmement en rapportant les opérations de résolution et les contenus concrets auxquels se rapportent les inscriptions symboliques à des inférences opérées sur les symboles assemblés. C'est à cette condition qu'il est possible d'obtenir une machine sémiotique ou système diagrammatique. Ce système, il faut dès lors le munir d'un mode d'emploi afin d'en expliciter les conditions de mise en fonctionnement, pour que l'interprétation du diagramme par un être humain, et donc sa mise en fonctionnement à travers son appropriation et sa manipulation, permette de résoudre le problème qu'il modélise et dont il explicite la méthode de résolution à travers son mode d'emploi. Ce qu'affirme le principe de représentation diagrammatique, c'est que la symbolisation des opérations et des objets du domaine pratique dans lequel ces opérations et objets s'enracinent modélise ce domaine pratique dans la mesure où les symboles assemblés dénotent et font référence aux objets et aux opérations du domaine pratique. Le symbolisme diagrammatique est alors un principe de modélisation fondé sur un postulat épistémologique portant sur la nature de la connaissance : son caractère de forme symbolique irréductible à toute formalité logique.

À la différence d'un système formel, un système diagrammatique ne désigne pas un ensemble de règles de manipulation et de signes ininterprétés sur lesquels ces règles permettent d'opérer. Il désigne au contraire un mode d'emploi portant sur des signes motivés. Pour cette raison, il fait donc appel à l'attention et à l'intuition de l'interprétant pourvu de conscience qui s'en saisit. Mais afin de rendre effective la résolution de

problème modélisée par le système diagrammatique, il faut munir ce système d'un principe d'effectivité pour rendre concrète et réelle son opérationnalisation. Nous nommons un tel principe d'effectivité le *principe d'opérationnalisation*, et nous affirmons qu'il repose sur une propriété fondamentale des systèmes diagrammatiques, à savoir leur iconicité. Le principe d'opérationnalisation est celui qui fait passer le diagramme du statut de *modèle* de résolution à celui d'*outil* de résolution, grâce à ses propriétés iconiques.

L'approche de l'ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques repose sur le fait que les connaissances exprimées par un symbolisme diagrammatique héritent des situations dans lesquelles elles sont ancrées la propriété de véhiculer des contenus opératoires qui peuvent être exprimés de façon iconique. Le symbolisme diagrammatique et sa sémantique opératoire ne sont pas seulement référentiels, ils sont aussi expressifs. Or cette expressivité matérielle rend possible deux choses : 1° l'*isomorphisme structurel* des diagrammes aux situations concrètes en tant que modèles statiques permettant de comprendre une situation (ici diagrammes = schémas = modèles d'intelligibilité) ; 2° l'*isodynamisme opérationnel* des diagrammes à des situations d'interactions et à des enchaînements d'opérations qui en font des guides permettant de lire des situations réelles à partir d'idéaux-types (ici diagrammes = idéaux-types d'actions à accomplir) et d'y répondre pragmatiquement.

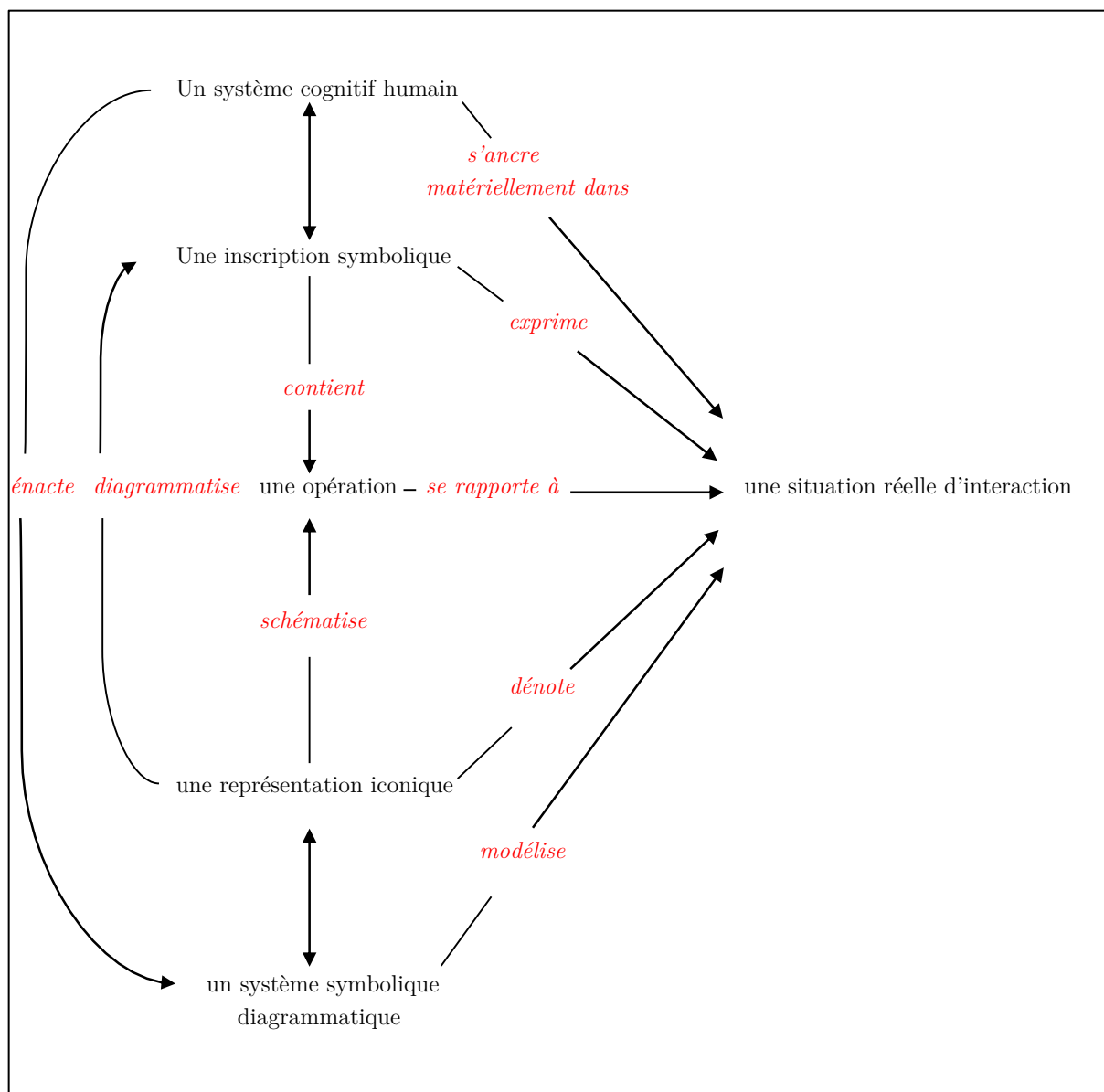


Figure 1 : Représentation diagrammatique systématique d'un système d'intelligence artificielle diagrammatique¹⁵

Cette représentation graphique permet de diagrammatiser deux choses :
 1° les énoncés linguistiques au fondement de notre approche diagrammatique de l'IA ;
 2° cette approche diagrammatique elle-même. Nous pensons donc avoir trouvé le diagramme des diagrammes, c'est-à-dire le modèle de ce qu'est une machine sémiotique.

¹⁵ Lorsque les Figures ne font pas l'objet d'un appel de note, c'est qu'elles sont de nous ; lorsqu'elles font l'objet d'un appel de note, c'est que nous en donnons la source, soit sitographique, soit bibliographique. Lorsque les Figures ne sont pas de nous mais que nous les avons annotées, nous ajoutons la mention « modifiée ».

Ce modèle est le complément de la machine universelle de Turing et la mise en évidence de son impensé, parce qu'il permet de mettre au jour le versant non calculable de l'expérience que réussit à capter tout diagramme, à savoir le contenu rationnel symbolique non formel qu'est toute opération non calculable.

Toute opération non calculable peut en effet être schématisée à travers une représentation iconique opérationnellement interprétable grâce à la sémantique opératoire du diagramme explicitée à travers son mode d'emploi. Car le mode d'emploi d'un diagramme est l'explicitation linguistique qui permet : 1° d'interpréter le ou les schémas en son cœur comme formant la représentation des opérations non computationnelles qu'il modélise ; 2° de le manipuler méthodiquement, puisque cette explicitation guide la mise en œuvre opérationnelle et pratique du contenu non calculable dont ces schémas sont porteurs dans une situation problématique dont le codage algorithmique ne suffit pas à fournir une méthode de résolution. Les saillances et intervalles de cette situation qui ne peuvent être codés algorithmiquement, c'est-à-dire par des moyens calculatoires, forment donc les structures d'accueil (affordances) des opérations non calculatoires de cette méthode de résolution non formelle mais pourtant effective dont est porteuse toute machine sémiotique qu'est un diagramme.

La Figure 1 est non seulement la preuve de la première thèse que nous avançons – selon laquelle *un diagramme est une machine sémiotique* – mais en plus de cela elle légitime d'avancer une autre thèse, à savoir celle selon laquelle *la première thèse est elle-même la bonne définition de ce qu'est un diagramme*. Car cette représentation canonique de ce qu'est un diagramme est elle-même une machine sémiotique qui présente les relations systématiques entre une situation mondaine d'interaction, un système cognitif qui cherche à la comprendre et un système diagrammatique qui la modélise pour que la compréhension théorique se transforme en résolution pratique. La thèse selon laquelle *un diagramme est une machine sémiotique* est donc un théorème dont les analyses de cas que nous proposerons seront les preuves multiples.

1.1 Un double constat

Notre travail est fondé sur un double constat : d'une part le caractère symbolique et rationnel des représentations diagrammatiques, c'est-à-dire la validité du principe de diagrammatisation comme principe de modélisation ; d'autre part sur le caractère opérationnel de l'iconicité diagrammatique, qui rend possible la résolution humaine de problèmes pratiques. Les systèmes diagrammatiques sont des modèles parce qu'ils sont des systèmes symboliques signifiant des opérations ayant un « ancrage matériel » (Hutchins) commandant l'investissement intentionnel des consciences qui s'en saisissent comme d'outils graphiques dont l'utilisation est guidée par l'explicitation linguistique des modes d'emploi qui leur sont associés. Nous proposons dans les deux premières parties une méthodologie qui exploite ce fait, l'*ingénierie sémiotique*, et dans une troisième partie une philosophie qui essaie de comprendre ce fait, l'*herméneutique opératoire*.

Notre propos est en effet de proposer une méthodologie de l'IA qui caractérise l'oubli de la position logiciste et formaliste en IA : à savoir le caractère symbolique, effectif et pourtant non computationnel des représentations diagrammatiques. C'est à la mise en évidence de moyens visuels d'élaborer des connaissances théoriques et pratiques à l'aide de représentations diagrammatiques que se consacre l'ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques, nom que nous donnons à l'intelligence artificielle conçue et réalisée dans ce cadre de recherche. Car le système diagrammatique construit doit produire un sens dans le domaine pratique reconnu par ceux qui le lisent et l'utilisent comme un outil d'assistance à la résolution de problèmes non solubles par des voies intégralement algorithmiques.

Ensuite il faut comprendre pourquoi la diagrammatisation de connaissances opératoires en permet l'opérationnalisation effective non computationnelle par les agents à la fois lecteurs et acteurs qui s'en saisissent dans un processus d'individuation sémiotique. Il faut donc comprendre le statut de ce qui est effectif et pourtant non computationnel en déployant une philosophie de l'intelligence artificielle graphique.

En articulant la théorie du support (qui nous vient de B. Bachimont) à l'ontogenèse (qui nous vient de G. Simondon) grâce à la sémiotique diagrammatique (qui nous vient de C. S. Peirce), c'est-à-dire en articulant une théorie matérialiste et sémiotique de la connaissance à la théorie générale des processus d'individuation conceptualisée par Simondon, nous visons ainsi à soutenir deux thèses complémentaires : d'une part que *l'inscription diagrammatique correspond à l'enregistrement de la connaissance opératoire* (thèse 1) ; d'autre part que *la connaissance opératoire correspond à l'intuition et à l'actualisation analogiques de l'inscription diagrammatique* (thèse 2). La deuxième thèse, qui est la réciproque de la première, suppose la réhabilitation de l'analogie comme méthode d'invention dont l'herméneutique opératoire est la philosophie.

Nous cherchons donc d'une part à montrer qu'il est possible de matérialiser le schème opératoire dont nous parle Simondon à travers son œuvre ; d'autre part que dynamiser le schéma matérialisé dans un symbolisme diagrammatique, c'est révéler en quoi le schématisme participe d'une activité pratique où le sujet connaissant ne soumet pas l'expérience aux pouvoirs de ses facultés, mais ouvre ses facultés à des expériences inédites, à travers un type d'intuition qui tire sa source dans les écrits morphologiques de Goethe¹⁶. *L'intuition diagrammatique* est selon nous ce « jugement par perception intuitive » dont parlait le père de la morphogenèse : elle est ce qui produit un supplément d'intelligibilité en vertu d'une nécessité.

Dans le sillage des travaux de J. Goody¹⁷ et B. Bachimont¹⁸, nous souhaitons donc mettre au jour une « raison diagrammatique » ancrée dans de nouveaux supports symboliques d'instrumentation du savoir, les diagrammes, qui autorisent selon nous un nouveau type de synthèse qu'il nous faudra caractériser et dont nous allons mettre au

¹⁶ J. W. von Goethe, « Anschauende Urteilskraft » (1820), *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, Abt. 1, Bd. 9: Morphologische Hefte 1817-1824, Leopoldina Ausgabe, Böhlau, Weimar, 1954.

¹⁷ J. Goody, *La raison graphique : la domestication de la pensée sauvage*, Paris, Minuit, 1979.

¹⁸ B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*, mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université de technologie de Compiègne, 2004.

jour le mode de fonctionnement. Cette synthèse, c'est la synthèse pratique de l'imagination diagrammatique comme imagination inventive.

1.2 Diagramme : machine, modèle, instrument de calcul et outil graphique

Un diagramme fonctionne, car c'est une machine. Cette machine est sémiotique, car elle est intégralement composée de signes. En tant que machine, le diagramme possède donc une dimension algorithmique qui le rend partiellement automatisable, car un diagramme est aussi un outil sémiotique, dans la mesure où il est toujours composé de signes. Il possède donc toujours cette autre dimension sémiotique, qui le rend irréductible à toute formalité logique comme à toute effectivité computationnelle. En outre, il permet de répondre à un type de questions, car c'est une machine graphique intégralement composée de signes, construite pour modéliser un type de problème ou de situation. Par conséquent, comme le diagramme est construit en vue de remplacer un problème ou une situation d'interaction qui peuvent se présenter dans l'expérience réelle, c'est aussi un modèle. En tant que modèle, on peut donc l'interroger et il répond, indépendamment du fait que la réalité qu'il modélise soit actuelle ou inactuelle, c'est-à-dire ait lieu ou n'ait pas lieu ici et maintenant.

Un diagramme est donc une machine sémiotique qui fonctionne comme un modèle mais aussi comme un outil. Cela signifie que dès lors que le diagramme est utilisé comme un système isolé, c'est-à-dire comme une machine et/ou comme un modèle, il peut être réduit à un instrument de calcul. En revanche, dès lors qu'il est conçu pour être sollicité comme un outil potentiel, le diagramme devient, dans le couplage structurel diagramme/utilisateur du diagramme, l'instrument de résolution du problème posé entre un individu et son environnement, à condition que l'individu sache non seulement lire le diagramme, mais aussi reconnaître dans la situation problématique à laquelle il est confronté un cas analogue au diagramme en tant que modèle, tant du point de vue de sa structure que de son mode de fonctionnement, c'est-à-dire de son mode d'existence.

2. Intelligence, intelligence artificielle et intelligence artificielle diagrammatique

2.1 Intelligence

Intelligent représente l'adjectif qualificatif d'un système. Selon nous, il ne caractérise pas la propriété d'un phénomène étudié par les sciences de la nature, mais celle d'un artefact créé par l'homme, qui l'aide à accomplir une action dans le monde. Construire un système intelligent, c'est construire un système capable de rendre plus intelligent son utilisateur, qui en utilisant le système, fait preuve d'intelligence. Un système intelligent est donc un système qui permet à son utilisateur de réaliser des tâches intelligentes *avec* lui et non à sa place. Notre projet est donc technologique et pratique et vise à modéliser graphiquement des classes de problèmes qui ne possèdent pas de solution algorithmique, c'est-à-dire qui ne sont pas solubles dans des méthodes calculatoires.

Pour résoudre un problème, il faut disposer de connaissances à son sujet. À partir des connaissances que l'on trouve exprimées au sujet d'un problème, il faut trouver une contrepartie graphique et linguistique pour les rendre interprétables et opérationnalisables à travers la lecture du système graphique (diagramme) modélisant le problème dont ces connaissances sont les connaissances de résolution. Il s'agit donc de construire un modèle graphique, qui est un système à base de connaissances modélisant une situation ou un problème donné, identifié de façon systématique. Ces problèmes peuvent être des besoins clients, des problèmes techniques de construction, des problèmes d'agents en situation d'interaction, etc. Les modèles diagrammatiques doivent à la fois schématiser et dénoter des situations dans lesquelles se posent des problèmes et tous les éléments qui interviennent comme données du problème.

2.2 Intelligence et intelligence artificielle

Dans le cadre de notre travail, nous entendons par intelligence artificielle le projet technique visant à instrumenter la résolution de problèmes pratiques pour lesquels on

dispose de connaissances exprimées et véhiculées à travers des énoncés linguistiques et des schémas graphiques. Selon cette définition, relèvent de l'IA les problèmes de conception en ingénierie, de construction d'objets fonctionnels que l'on peut acquérir dans le commerce, de plans d'actions collectives préventives dans le cadre de la vie d'une société, d'une entreprise ou d'un établissement, qui permettent de guider la résolution de problèmes pratiques, c'est-à-dire tous les problèmes pour lesquels on ne dispose pas de théories scientifiques pour les résoudre. Dans cette perspective, le projet visant à construire des systèmes intelligents consiste selon nous dans le projet de réaliser des systèmes graphiques dont la bonne utilisation est une preuve d'intelligence, non seulement du côté des concepteurs qui les produisent que des usagers qui les utilisent pour mettre en œuvre les opérations qu'ils décrivent dans des tâches effectives. Ces tâches sont pratiques et consistent à réaliser les opérations de résolution lorsqu'on se trouve confronté aux problèmes. Cette caractérisation ne fait donc pas appel à la notion de faculté cognitive entendue comme substrat biologique soumis à la légalité des sciences de la nature.

Notre définition de l'IA est donc neutre par rapport à la question du statut de l'esprit humain et de toute question métaphysique à son sujet. Notre approche est *sémiotique*, car elle permet de montrer en quoi les signes, pas nécessairement linguistiques, permettent de parler de notre monde et d'exprimer notre rapport à lui. L'effort consiste donc à partir des connaissances exprimées par des agents familiers d'un certain type de problème, d'obtenir une expression graphique de ces connaissances pour en faciliter la compréhension, l'acquisition et la mise en œuvre par ceux qui les lisent.

2.3 Intelligence artificielle et intelligence artificielle diagrammatique

Par intelligence artificielle diagrammatique, nous entendons un projet technologique visant la modélisation de connaissances pratiques pour que celles-ci soient exploitables par un agent qui interagit avec le système diagrammatique et cela en vue de mobiliser

les connaissances capturées par le système en question afin d'être apte à résoudre le problème singulier auquel il peut être concrètement confronté dans une situation réelle d'interaction.

Par pratique nous entendons l'interaction entre un agent et son environnement ; par problème concret, le problème auquel est confronté l'agent dans une interaction particulière avec son environnement. Le système diagrammatique, c'est la modélisation des connaissances mises en œuvre par l'agent pour résoudre ce problème particulier. Le couple $\frac{\text{Système diagrammatique}}{\text{Lecteur du diagramme}}$, en tant qu'il donne lieu à un nouveau type d'interaction, donne aussi lieu à la production de nouvelles connaissances pratiques portant sur l'utilisation et la manipulation du diagramme. Le diagramme devient alors un *outil cognitif* qui apporte à l'utilisateur de nouvelles connaissances guidant son comportement de résolution dès lors qu'il se retrouve confronté dans le monde concret à une situation problématique *analogue* à la situation de départ modélisée par le système diagrammatique.

Notre hypothèse, à la suite du travail de Bruno Bachimont, est que la constitution de nos connaissances provient de notre utilisation des outils matériels fabriqués dans des contextes concrets, afin de répondre à des besoins. La diagrammatique n'est pas un modèle de l'esprit, mais l'étude d'objets particuliers, les diagrammes, dont l'utilisation dans des contextes concrets d'interaction permet la constitution de nouvelles connaissances. Cela suggère deux choses. D'une part que toute connaissance procède d'un outil dont elle décrit l'interaction avec un utilisateur dans le cadre d'un contexte d'utilisation et de résolution où se pose un problème réel. D'autre part, que la diagrammatique propose la médiation d'outils cognitifs particuliers, les diagrammes.

Nous avons montré plus haut que l'IA diagrammatique a besoin d'un principe de modélisation et d'un principe d'effectivité pour se réaliser comme ingénierie sémiotique :

- le *principe de modélisation* explicite sous forme d'énoncés linguistiques et de schémas graphiques un savoir pratique et la manière dont il se rapporte au monde

concret dans des opérations d'interactions contextualisées, c'est-à-dire particulières ;

- le *principe d'effectivité* explicite comment opérationnaliser le système diagrammatique obtenu au terme de la modélisation. Ce principe recèle lui aussi des connaissances pratiques, de second niveau, portant sur la manipulation du modèle lui-même, puisqu'il correspond à la diagrammatique comme savoir technique de la manipulation des diagrammes.

L'enjeu de l'ingénierie sémiotique est donc de développer un réalisme pratique et un pragmatisme, le premier étant informé par la modélisation diagrammatique, et le second préparé par la simulation diagrammatique.

3. Intelligence artificielle diagrammatique et analogisme

Il faut distinguer l'analogisme comme modélisation diagrammatique des connaissances et l'analogisme comme effectivité opératoire. L'analogisme comme modélisation des connaissances pratiques consiste à affirmer que modéliser les connaissances au moyen d'un symbolisme diagrammatique, c'est dégager le système de symboles graphiques permettant d'exprimer sous forme de schémas, de diagrammes et d'énoncés linguistiques le contenu intuitif dont ces connaissances sont porteuses. L'analogisme devient dans cette perspective une théorie épistémologique portant sur la nature de la connaissance. L'analogisme comme effectivité opératoire correspond au fait que l'iconicité opérationnelle des diagrammes correspond à la description de l'effectivité d'opérations non computationnelles exécutées avec succès au terme d'une lecture correcte des diagrammes.

3.1 Précisions terminologiques

Modèle pratique : système de connaissances médiatisées par des représentations graphiques permettant de raisonner sur une réalité objective concrète et pratique. Il se caractérise par :

- sa **systematicité** : toutes les connaissances nécessaires à la résolution du problème sont reliées les unes aux autres ;
- sa **cohérence fonctionnelle** : un modèle pratique doit fonctionner et pour fonctionner il doit être diagrammatique et cohérent ;
- sa **correction** : qu'il recherche en n'autorisant que des opérations de transformations effectives sur la réalité qu'il vise au terme de sa lecture/manipulation ;
- sa **complétude** : le modèle doit contenir tous les éléments permettant de résoudre le problème qu'il modélise et auquel il reconduit dans un contexte pratique où le problème se pose de façon réelle.

Diagrammatique : tout ce qui est consigné dans le cadre d'un système d'écriture où la compréhension de ce qui est écrit est impulsée par la forme graphique des symboles utilisés et explicités. Le niveau diagrammatique et le niveau linguistique ne s'opposent pas mais se complètent. Le second est la condition d'explicitation du premier, même si le contenu véhiculé par le niveau diagrammatique est irréductible au contenu véhiculé par le niveau linguistique.

Diagrammatisation : le fait d'exprimer des connaissances dans une écriture diagrammatique.

Modélisation analogique ou iconique : conception d'un modèle scriptovisuel. Parmi les modèles scriptovisuels il faut distinguer :

- la **schématisation**, où le modèle représente et décrit la structure du problème ou de la situation modélisée. C'est par exemple la description d'un circuit électrique au moyen d'un schéma technologique, où la description du cycle de l'eau dans un

schéma encyclopédique. En d'autres termes une schématisation élabore une description graphique simplifiée d'un système à étudier afin de comprendre de quoi l'on parle et sur quoi on travaille avant d'expliquer pourquoi on travaille sur ce qu'on schématise, comment fonctionne ce qu'on schématise et comment faire fonctionner avec soi et pour d'autres ce qu'on schématise, c'est-à-dire ce sur quoi on travaille ;

- la **diagrammatisation**, où le modèle décrit les phases du processus de résolution du problème affronté et prescrit les actions à accomplir du point de vue de l'utilisateur pour résoudre effectivement le problème dont il est question. C'est par exemple la description des étapes d'un projet au moyen d'un diagramme de Gantt pour représenter visuellement l'ordre à suivre afin d'optimiser sa planification et faciliter sa communication auprès de l'équipe de travail en charge de la réalisation du projet. Ce peut être aussi la modélisation de données et d'activités au moyen de datagrammes et d'actigrammes dans le cadre de la technique structurée d'analyse et de modélisation SADT mise en œuvre en analyse fonctionnelle technologique en sciences de l'ingénieur.

Après ces clarifications terminologiques, revenons à l'analogisme et montrons comment il fournit à l'ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques le principe de modélisation et le principe d'effectivité dont elle a besoin pour mener à bien son projet.

3.2 Principes de l'IA diagrammatique

3.2.1 Analogisme et modélisation des connaissances

L'analogisme comme modélisation des connaissances affirme que la schématisation des connaissances permet de dégager un contenu qui n'est pas capturé par des représentations formelles. Il affirme qu'il est possible de représenter des connaissances qui échappent au formalisme comme principe de modélisation. Confronté à une connaissance pratique, il est nécessaire, pour dégager le savoir qu'elle renferme, de ne pas

faire abstraction du contenu schématique sur lequel le sujet connaissant s'appuie au moyen de la faculté intuitive, lorsque ce dernier est en prise avec la matière qui bouge et qui parle de façon muette, et avec laquelle il entretient un dialogue silencieux.

Ce contenu est structuré par le caractère lisible et visible de la matière sur laquelle la faculté intuitive s'appuie pour mettre en œuvre le savoir pratique. Une connaissance pratique est en effet inscrite dans un rapport à la matière : elle est l'interaction avec l'objet grâce à la médiation duquel nous sommes en mesure d'accomplir une action dans le monde pour en produire la transformation. Rendre visible et lisible une telle connaissance pratique, c'est rendre lisibles et visibles les opérations de transformation en schématisant l'ensemble des objets du monde sur lesquels les sujets pratiques opèrent et l'ensemble des transformations que ces opérations produisent au terme de leur accomplissement. C'est donc rendre visible et lisible, par la médiation de schémas et de diagrammes, les matières, objets et opérations de transformation du monde concret, suivant des conventions interprétatives et suivant un ordre de lecture permettant l'actualisation du savoir pratique, c'est-à-dire la démonstration que la lecture et la compréhension du diagramme dans sa structure et dans son fonctionnement permettent la production d'une série d'opérations prédictibles, prévisibles et donc reproductibles, parce que déjà capturées, symbolisées, analysées, sériées, explicitées et ordonnées suivant des conventions de lecture prescriptives.

Il en résulte la chose suivante du point de vue d'une philosophie du sens pratique : toute connaissance pratique est porteuse d'un contenu communicable, car ce qu'un schéma ou un diagramme veut dire s'il possède du sens, c'est-à-dire véhicule une connaissance pratique, consiste dans les relations opératoires qu'il décrit et qu'il prescrit suivant une argumentation qui légitime les descriptions et prescriptions proposées. En d'autres termes, il n'y a pas de différence de nature entre les langues naturelles et les langages scripto-visuels qu'elles explicitent dans la mesure où ces derniers sont conçus pour dégager le contenu pratique des expressions linguistiques en tant qu'elles véhiculent

et expriment des connaissances pratiques. L'iconicité de l'écriture diagrammatique permet ainsi de dépasser l'opposition entre langue naturelle et langage artificiel dans l'expression des connaissances pratiques.

Il est donc possible de ne pas opposer le sens commun et la vérité rigoureuse. Si le sens commun détient une vérité sur le monde, c'est qu'il détient un contenu pratique qui le rend analogue aux caractères d'une écriture iconique rigoureusement codifiée et contrôlée. Toute connaissance pratique est donc iconique. Dès lors il s'agit de savoir si l'iconicité en question est une iconicité structurelle ou une iconicité opérationnelle, et si les modèles conçus consistent en des schématisations ou des diagrammatisations.

Si le projet de l'IA diagrammatique est de résoudre des problèmes pratiques en guidant l'opérationnalisation des connaissances pratiques exprimées en langue naturelle et dans une écriture scriptovisuelle dont on dispose sur ces problèmes, l'analogisme est ce qui procure le principe modélisateur de la démarche de l'IA diagrammatique : l'ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques modélise la réalité du problème à résoudre en schématisant les connaissances pratiques puisque la diagrammatisation ne fait rien d'autre qu'extraire et mettre en forme les contenus dont sont porteuses les connaissances pratiques du problème à traiter.

Mais il faut en outre disposer d'un principe opérationnel pour que le modèle graphique obtenu devienne effectif dans une mise en œuvre qui démontre et prouve que le modèle construit permet de résoudre grâce à l'agent qui se l'approprie le problème auquel il est confronté et qui a fait l'objet de la modélisation. Il s'agit d'obtenir un principe général qui nous assure qu'un modèle construit par une schématisation ou une diagrammatisation est toujours opérationnalisable. Il faut donc disposer d'un principe opérationnel qui nous assure par principe que toute diagrammatisation est effective. Un tel principe est donné selon nous par la notion de machine sémiotique universelle, qui est le complément de la notion de machine de Turing universelle.

3.2.2 Analogisme et effectivité opérationnelle

Le diagrammatisme n'est pas seulement une conception épistémologique de la connaissance défendant l'iconicité du savoir pratique. Le diagrammatisme précise également en quoi l'iconicité renvoie à l'effectivité. Pour préciser en quoi l'iconicité renvoie à l'effectivité il faut montrer comment un réalisme des opérations peut être branché à une sémiotique diagrammatique via un artéfact permettant d'assurer la conservation des opérations à l'issue : 1° de leur modélisation graphique par un concepteur ; 2° de leur appropriation/interprétation sémiotique par un utilisateur.

Selon nous, c'est le caractère iconique des notations écrites qui fournit le principe d'effectivité dont l'ingénierie sémiotique a besoin, et qui, couplé au principe de modélisation schématique et diagrammatique, nous donne les moyens théorique et pratique de réaliser notre projet. En effet : 1° si les connaissances pratiques peuvent s'exprimer à travers des schémas et être analysées à travers un travail d'explicitation, d'approfondissement, de caractérisation et de précision de ces schémas ; 2° que tout raisonnement opéré sur ces connaissances schématisées revient à effectuer des opérations de lecture correspondant à de réels pas opératoires, c'est-à-dire aux opérations effectives non calculatoires, c'est-à-dire humaines, dont les schémas sont les symboles, alors 3° on obtient bien un système potentiel de résolution, opérationnel et non computationnel, dont l'interprétation permet une résolution de problème effective et diagrammatique, c'est-à-dire opérée à partir de diagrammes et opérant diagrammatiquement dans la mesure où les opérations actualisées dans la série des pas opératoires sont effectives et pourtant non calculatoires.

4. Un exemple : la diagrammatisation de la syllogistique

À travers l'analyse d'un exemple historique, la diagrammatisation de la syllogistique, nous illustrerons dans un premier temps la thèse selon laquelle *un diagramme est une machine sémiotique*.

Jusqu'à l'époque moderne, la formalisation la plus aboutie de cette discipline qu'on appelle la logique a été la théorie aristotélicienne des syllogismes. De l'Antiquité jusqu'au 19^e siècle, la théorie d'Aristote a en effet représenté un modèle formel dans l'art de raisonner. Il ne faut d'ailleurs pas réduire cet art à la seule logique formelle, car il comprend aussi cette autre partie qu'est l'argumentation rhétorique, qui est le versant pragmatique et empirique de l'art de raisonner.

Des premiers travaux d'Aristote jusqu'à la scolastique médiévale, la logique s'est restreinte à l'analyse de la langue naturelle. La proposition, composée d'un sujet, d'une copule et d'un prédicat, en constitue l'élément de base. Elle possède quatre formes : l'universelle affirmative (A) ; l'universelle négative (E) ; la particulière affirmative (I) et la particulière négative (O). On peut les représenter à travers un schéma qu'on appelle le « carré logique », puisqu'il représente géométriquement sous la forme d'un carré les oppositions logiques entre ces quatre formes (A, E, I, O).

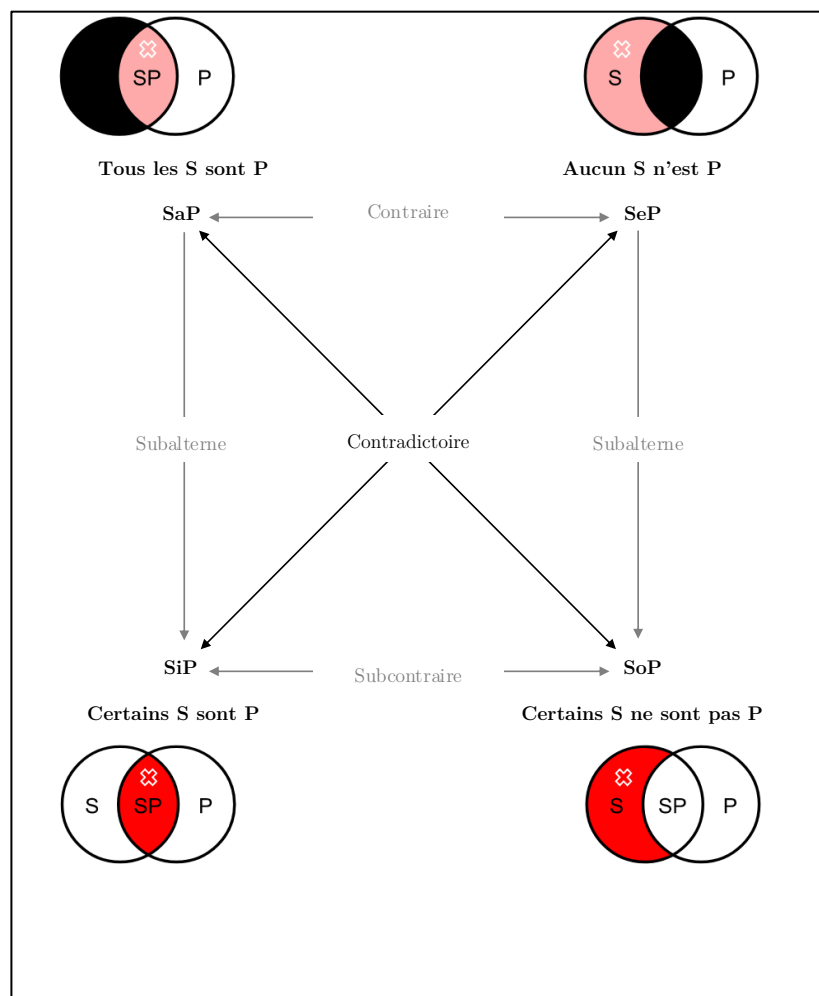


Figure 2 : Schéma systématique des formes propositionnelles fondamentales (Carré logique)

Pendant presque deux mille ans, on a tenu le système aristotélicien des formes valides de déduction pour complet en pensant qu'il n'était pas possible de l'améliorer. Le renouveau des études logiques à l'époque moderne est dû à George Boole (1815-1864), grâce au développement de ce qu'on appelle l'algèbre de la logique.

4.1 Algèbre symbolique et algébrisation de la logique

Boole appartient à un courant de pensée, que l'historien des sciences tchèque Luboš Nový (1929-2017) a appelé l'« École algébrique anglaise ». La rupture opérée par ce groupe de savants a consisté en un changement de point de vue sur la réalité des objets mathématiques qui a induit une mutation d'une branche des mathématiques : l'algèbre. Les algébristes, dont la tâche depuis l'Antiquité était de parvenir à résoudre des

équations, ont commencé, au sortir de la révolution industrielle, vers 1830, à déplacer leur centre d'intérêt de l'étude de la résolution des équations vers celle des lois abstraites opérant sur des ensembles d'éléments définis *a priori*, c'est-à-dire indépendamment de toute préoccupation de savoir si ces entités définies correspondent à des objets existant réellement ou non. L'École algébrique anglaise a initié dans une certaine mesure le mouvement formaliste, car elle s'est concentrée sur l'étude des structures abstraites et des conditions axiomatiques de leurs propriétés opératoires¹⁹.

Le problème de ces savants n'était en effet pas de savoir si la pratique mathématique doit être légitimée par l'existence des objets dont elle parle et sur lesquels elle prétend travailler ; il était de savoir à quelles conditions des procédures opératoires mises en œuvre dans certaines branches des mathématiques peuvent légitimement être transférées dans d'autres branches. Le sujet de leur préoccupation concernait la pratique des mathématiques telle qu'elle est examinée réflexivement par un point de vue interne de praticiens et de techniciens, qui réfléchissent activement sur ce qu'ils font. Dans leur cas, cela est passé par une réflexion sur l'écriture et les systèmes de notations utilisés pour exprimer les problèmes sur lesquels ils travaillaient²⁰.

Cette réforme de l'algèbre conduite à travers une réflexion sur la forme du symbolisme à utiliser dans l'écriture des mathématiques prend le nom sous l'impulsion du mathématicien George Peacock (1791-1858) d'« algèbre symbolique ». Par algèbre symbolique, Peacock désigne la science démonstrative et abstraite qui s'oppose à la science physique. Il ne s'agit pas d'une science dans laquelle on cherche à vérifier les raisonnements en ayant recourt au contrôle expérimental d'une nature appréhendée au

¹⁹ C. Ruffieux, *La naissance du concept de structure algébrique en Grande-Bretagne dans la première moitié du 19^e siècle*, Thèse de doctorat, n° 3622, Université de Genève, 2005.

²⁰ Cette réflexion interne sur les pratiques d'écriture et sur les transferts de procédés et de procédures à opérer entre les différentes branches des mathématiques, qui est actuellement un champ de recherche très actif en épistémologie des pratiques mathématiques, le philosophe et logicien américain Peirce, à la fin du 19^e siècle, lui a donné le nom de « philosophie de la notation » (*philosophy of notation*) dans un article éponyme daté de 1885 : C. S. Peirce, « On the Algebra of Logic: A Contribution to the Philosophy of Notation », *American Journal of Mathematics*, vol. 7, n° 2, 1885, p. 180-196.

moyen de l'outil mathématique ; il s'agit d'une science qui prend pour objet l'esprit afin d'en identifier les lois de fonctionnement. S'agit-il pour autant d'une psychologie ?

Non, car l'objectif n'était pas de saisir les lois de l'esprit à travers l'étude expérimentale de son activité dans un laboratoire. Il s'agissait d'étudier l'esprit à travers ses expressions dans le langage. L'analyse du langage était ainsi conçue comme la méthode d'accès aux lois de l'esprit. Le premier à avoir opéré une telle démarche est John Locke. Il sera suivi au 18^e siècle par les penseurs des Lumières écossaises (tels que Thomas Reid, Dugald Stewart, etc.). Ce qu'il s'agit de dégager, ce sont les lois du langage de l'algèbre, conçu comme le langage du raisonnement symbolique.

En définissant l'« algèbre symbolique » comme une science de l'esprit, Peacock affirme l'indépendance des opérations de l'algèbre par rapport aux objets sur lesquels elles opèrent. C'est pourquoi il ne définit plus l'algèbre comme la science des grandeurs calculables, mais comme la science des opérations de l'esprit telles qu'elles sont sédimentées dans les lois qui régissent l'ordonnement et la combinaison de symboles graphiques²¹. Les objets à connaître ne sont donc plus des quantités, mais des propriétés opératoires qui agissent sur des transformations symboliques. C'est pourquoi on peut dire de l'algèbre qu'elle est une technologie graphique : c'est une technique de transformations des quantités réduites à des symboles manipulables.

L'objectif de notre propos est de montrer, à travers l'analyse d'un exemple simple mais non trivial, comment la logique telle qu'on en a hérité d'Aristote, et au prix d'un certain nombre de transformations graphiques, a muté vers un régime d'écriture diagrammatique : 1° via une tentative de géométrisation initiée par Euler ; 2° via une tentative d'algébrisation initiée par Boole. La diagrammatisation de la logique a ainsi permis de constater que l'esprit peut s'observer fonctionner à travers une machinerie sémiotique qui exhibe ses opérations.

²¹ M.-J. Durand-Richard, « Genèse de l'Algèbre symbolique en Angleterre : une influence possible de John Locke », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 43, n° 2, 1990, p. 146.

Dans un second temps, nous montrons que dès lors que la logique devient diagrammatique, elle rend possible l'exhibition d'une logique de la pratique à travers l'expression schématique visuelle d'un contenu porteur de sens dont la structuration géométrique et la codification sémiotique autorisent la mise en œuvre d'un programme d'intelligence artificielle. Ce programme permet de caractériser : 1° l'impensé du formalisme logique hérité du Cercle de Vienne ; 2° le supplément d'intelligibilité qui excède toute effectivité calculatoire saisie par le formalisme computationnel hilbertoturingien. Cela nous permet de poursuivre la critique du formalisme en intelligence artificielle produite par B. Bachimont en lui donnant force de proposition à travers le développement d'une phénoménologie de la connaissance pratique adossée à une logique diagrammatique.

4.2 Géométrisation, algébrisation et diagrammatisation de la logique

Aristote présente dans l'*Organon* un type de raisonnement appelé syllogisme dont voici un exemple bien connu :

Prémisse 1 : Tous les Hommes sont Mortels
 Prémisse 2 : Tous les Grecs sont des Hommes
 Conclusion : Donc, tous les Grecs sont Mortels

(Syllogisme 1)

Le syllogisme permet de parler de choses qui existent, c'est-à-dire vraies pour certains individus et fausses pour d'autres. Il est toujours constitué de deux prémisses et d'une conclusion. Les prémisses et la conclusion prennent l'une des quatre formes suivantes :

Forme I	Tout A est B	Universelle affirmative
Forme II	Nul A n'est B	Universelle négative
Forme III	Quelque A est B	Particulière affirmative
Forme IV	Quelque A n'est pas B	Particulière négative

Figure 3 : Tableau des quatre formes fondamentales du syllogisme

Dans l'ensemble du syllogisme, les trois prédicats (A, B, C) qui interviennent apparaissent tous chacun deux fois. C'est donc du rapport de deux quantités (A, B) à une même troisième (C) que l'on déduit leur rapport réciproque. La forme la plus simple du syllogisme est le mode Barbara composé de trois propositions universelles affirmatives :

Prémisse 1 : Tout A est B
 Prémisse 2 : Tout B est C
 Conclusion : Donc, tout A est C

(Syllogisme 2)

L'expression géométrique eulérienne des deux prémisses universelles affirmatives consiste à représenter chaque notion par un espace et chaque espace par un cercle : pour la notion d'*homme*, on trace un cercle (A) dans lequel on conçoit que tous les hommes sont compris. Pour la notion de *mortel*, on trace un cercle (B) où l'on conçoit que tout ce qui est mortel est compris à l'intérieur de ce cercle. Si l'on considère la proposition : « Tous les Hommes sont Mortels », cela revient à inclure le cercle (A) dans le cercle (B) :

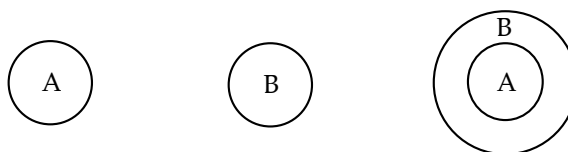


Figure 4 : Expression eulérienne de la proposition « Tous les hommes sont mortels »

De cette façon on représente géométriquement une proposition affirmative universelle, où le cercle (A), qui représente le *sujet* de la proposition, est entièrement inclus dans le cercle B, qui représente le *prédicat*. Traduit dans le système d'Euler, les quatre formes fondamentales du syllogisme énumérées plus haut s'expriment de la façon suivante :

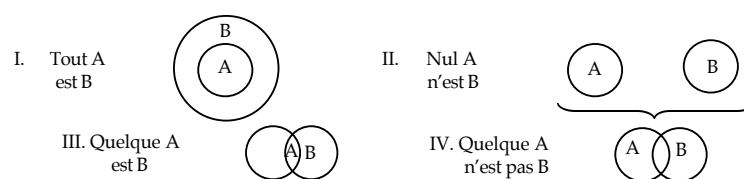


Figure 5 : Expression eulérienne des quatre formes fondamentales du syllogisme

Après Euler et avant Venn, Boole transpose le mode de raisonnement algébrique dans la logique pour qu'elle devienne une logique symbolique, c'est-à-dire une logique dont la validité des procédures ne dépend pas de la signification des symboles manipulés, mais seulement des lois de leur combinaison :

La caractéristique bien déterminée d'un *vrai calcul*, c'est d'être une méthode reposant sur l'emploi de Symboles, dont les lois de combinaison sont connues et générales, et dont les résultats admettent une interprétation cohérente²².

Faire une science des opérations de l'entendement, exposer les procédures du raisonnement sous forme d'un calcul algébrique, telle est la tâche que s'est fixé Boole dans *Les Lois de la pensée*²³. On est à l'articulation de la psychologie, de la logique et des mathématiques. Il s'agit de faire une science de l'esprit et d'expliquer les mécanismes qui régissent son objet grâce à l'algèbre.

La visée la plus profonde de Boole, comme Ernest Coumet l'a remarqué dans un article, est d'atteindre l'opération mentale élémentaire²⁴. Mais une fois cette opération atteinte, comment la faire correspondre à un symbole ? Comment extérioriser l'opération mentale élémentaire pour la mémoriser et la reconnaître, afin de pouvoir la reproduire dans un acte de lecture ? Comment symboliser l'opérateur élémentaire à l'œuvre dans le mécanisme d'inférence opéré par l'esprit ? Comment faire en sorte que les combinaisons de symboles d'opérations mentales expriment adéquatement l'activité de l'esprit ? Comment les symboles peuvent-ils dicter la marche à suivre à celui qui les interprète pour qu'il reproduise le schématisme opératoire d'une inférence effective valide ? Comment passe-t-on de l'enchaînement effectif des opérations à son expression symbolique, et de cette expression symbolique à sa reproduction dans un acte interprétatif valide et véridique ?

La méthode algébrique est celle qui, selon Boole, doit diriger l'enchaînement des opérations. Ce qu'il cherche à mettre sur pieds, c'est une théorie des équations logiques. Comme le rappelle S. B. Diagne dans son introduction aux *Lois de la pensée*, deux

²² G. Boole, *The Mathematical Analysis of Logic*, Oxford, Basil Blackwell, 1951, p. 4. Cité par E. Coumet : « Logique, mathématiques, et langage dans l'œuvre de G. Boole », in T. Martin & S. Roux (éd.), *Œuvres d'Ernest Coumet. Tome 1*, Besançon, Presses universitaires de Franche-Comté, 2016, p. 139.

²³ G. Boole, *Les lois de la pensée* (1854), Paris, J. Vrin, 1992.

²⁴ E. Coumet, « Logique, mathématiques et langage dans l'œuvre de G. Boole », in T. Martin & S. Roux (éd.), *Œuvres d'Ernest Coumet. Tome 1, op. cit.*, p. 137-176.

progrès en logique vont rendre possible son algébrisation, c'est-à-dire la transformation de la proposition en équation logique :

1. La quantification du prédicat. La proposition « Tous les hommes sont mortels » est universelle car le sujet « hommes » est quantifié par « tous ». Le sous-entendu de la proposition est « Tous les hommes sont quelques mortels », puisque la converse de la proposition de départ donne « Quelques mortels sont tous les hommes ». Or c'est la considération de la quantité particulière « quelques » du prédicat « mortels » qui permet de regarder la proposition « tous les hommes sont quelques mortels » comme une équation entre deux classes ayant la même extension ; et de substituer à la forme attributive classique « S est P » une forme équationnelle où la copule « est » est remplacée par le signe d'égalité « = » signifiant que deux classes ont les mêmes membres.

2. La notion d'univers du discours introduite par De Morgan à la fin des années 1840. Dans le cas de la négation, il s'agit de la faire porter sur le prédicat et non plus sur le sujet. La proposition « Nul homme n'est immortel » deviendra ainsi « Tout homme est non immortel ». Le prédicat privatif « non immortel » représente-t-il une classe définie ? Si on considère que les « immortels » et les « non immortels » forment la totalité de ce dont on parle, alors cette totalité est l'univers du discours. Autrement dit les « immortels » et les « non immortels » sont des termes complémentaires par rapport à l'univers du discours.

En donnant à la proposition logique – affirmative ou négative – la forme d'une équation, Boole transforme la représentation du raisonnement comme « enchaînement déductif de propositions » (Diagne) en une représentation du raisonnement comme calcul algébrique opéré sur des équations logiques. Dès lors on peut se poser la question suivante : existe-t-il un système diagrammatique exprimant le même ordre de généralité ? C'est à cette question que Venn a voulu répondre en cherchant l'expression diagrammatique du calcul algébrique des équations de la logique de Boole.

Soit les conventions interprétatives suivantes de l'algèbre de la logique :

- $\mathbf{1}$: désigne l'univers du discours ;
- \mathbf{X} : désigne un premier attribut ;
- \mathbf{Y} : désigne un second attribut ;
- \mathbf{x} et \mathbf{y} : désignent les classes qui possèdent les attributs \mathbf{X} et \mathbf{Y} ;
- $\bar{\mathbf{x}}$: désigne la classe $\mathbf{1} - \mathbf{x}$;
- $\bar{\mathbf{y}}$: désigne la classe $\mathbf{1} - \mathbf{y}$;
- \mathbf{xy} : désigne l'intersection des classes \mathbf{x} et \mathbf{y} ;
- $\mathbf{x} + \mathbf{y}$: désigne la somme logique des classes \mathbf{x} et \mathbf{y} .

Étant donné deux attributs \mathbf{X} et \mathbf{Y} , l'univers du discours symbolisé par $\mathbf{1}$ pourra être divisé en quatre classes disjointes, selon que les choses comprises dans cet univers possèdent ou ne possèdent pas l'attribut \mathbf{X} , et possèdent ou non l'attribut \mathbf{Y} . La conséquence qui en découle est la suivante :

$$\mathbf{1} = \mathbf{xy} + \bar{\mathbf{x}}\mathbf{y} + \mathbf{x}\bar{\mathbf{y}} + \bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{y}}$$

L'expression diagrammatique de cette équation est la suivante :

1

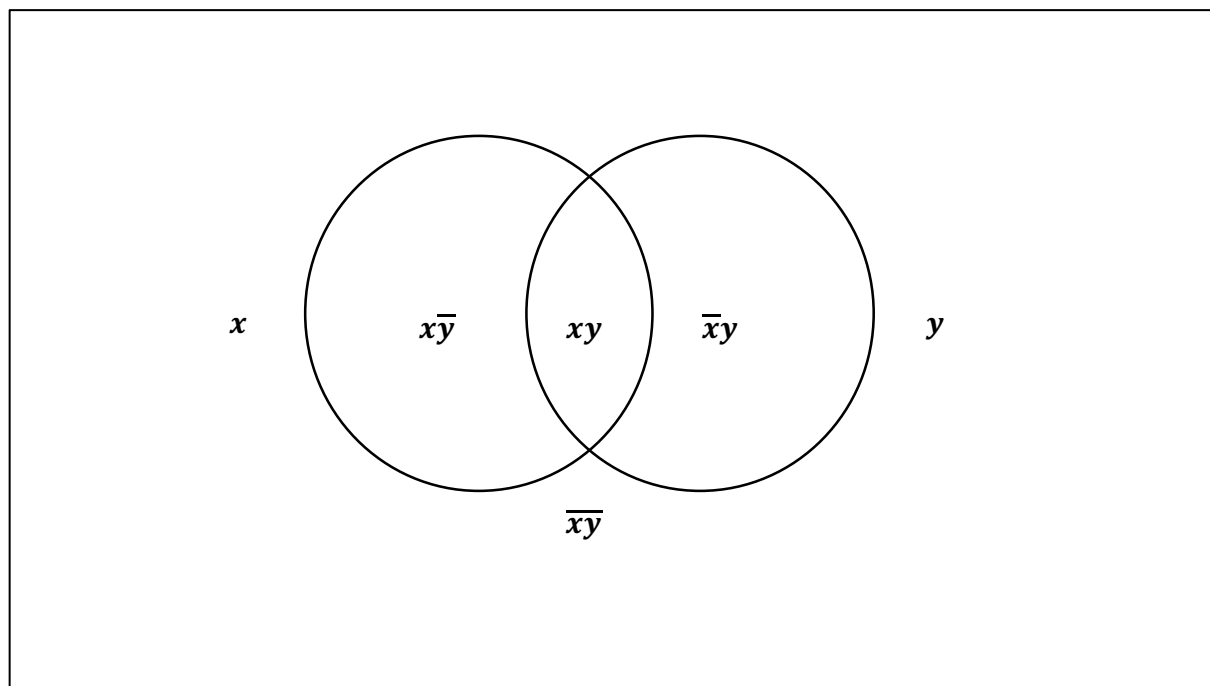


Figure 6 : Traduction diagrammatique de l'équation universelle

Le trait suscrit (*vinculum*) situé au-dessus de chaque lettre permet ainsi de matérialiser tous les prédicats privatifs reconnus comme les compléments des prédicats attributifs par rapport à l'univers du discours. Alors que la diagrammatisation eulérienne exprime une proposition qui énonce une relation déterminée entre deux classes, on peut observer que celle de Venn exprime la subdivision de l'univers du discours en quatre régions et fournit une sorte de matrice à l'intérieur de laquelle on pourra ensuite exprimer des propositions.

La différence cruciale entre Euler et Venn, c'est que Venn ne cherche plus simplement à représenter les relations entre les *termes* des propositions, mais les relations entre les *propositions*, et donc à considérer le groupe des syllogismes de la logique aristotélicienne comme une *totalité*. Le problème que cherche à résoudre Venn peut se formuler ainsi :

quelle doit être la structure d'un schéma géométrique pour que celui-ci exprime le groupe des substitutions des classes d'attribution de l'univers du discours sur lequel on souhaite raisonner ?

Après Euler et avant Frege, John Venn a fourni – grâce aux diagrammes qui portent maintenant son nom – non plus une représentation visuelle des relations entre *notions* exprimées dans les propositions logiques, mais une représentation visuelle des relations entre les *classes d'attribution*. Le principe est toujours le même : les relations entre classes d'attribution sont exprimées par des relations entre des figures géométriques ; les figures géométriques correspondent toujours à des cercles qui se recoupent. Il faut donc trouver le schéma géométrique correspondant à la traduction de l'univers du discours, dans lequel la combinaison d'un nombre fini de figures géométriques permet de visualiser le rapport de deux quantités x et y à une même troisième z , c'est-à-dire le groupe de leurs permutations dans l'univers du discours. Ainsi pour trois attributs X, Y, Z , on obtient les huit permutations des classes d'attribution suivantes : $xyz, xy\bar{z}, x\bar{y}z, x\bar{y}\bar{z}, \bar{x}yz, \bar{x}y\bar{z}, \bar{x}\bar{y}z, \bar{x}\bar{y}\bar{z}$. L'univers du discours doit cette fois-ci être divisé en huit classes disjointes :

$$1 = xyz + xy\bar{z} + x\bar{y}z + x\bar{y}\bar{z} + \bar{x}yz + \bar{x}y\bar{z} + \bar{x}\bar{y}z + \bar{x}\bar{y}\bar{z}$$

Venn en déduit que le schéma géométrique permettant d'exprimer une telle totalité est le suivant :

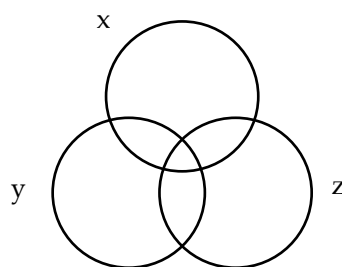


Figure 7 : Matrice diagrammatique découverte par Venn

Les règles d'interprétation des diagrammes sont les suivantes : si une région d'un cercle est hachurée, cela signifie que l'ensemble est vide ; s'il est pourvu d'une croix, cela signifie qu'il contient au moins un élément. Enfin, si une région, partielle ou totale, est vide, elle doit être interprétée comme n'exprimant aucune information (elle peut être vide ou non-vide nous n'en savons rien). Ainsi pour la notion d'*homme*, les diagrammes de Venn permettant d'exprimer les propositions « Il y a des hommes » et « Il n'y a pas d'hommes » se représentent de la façon suivante :

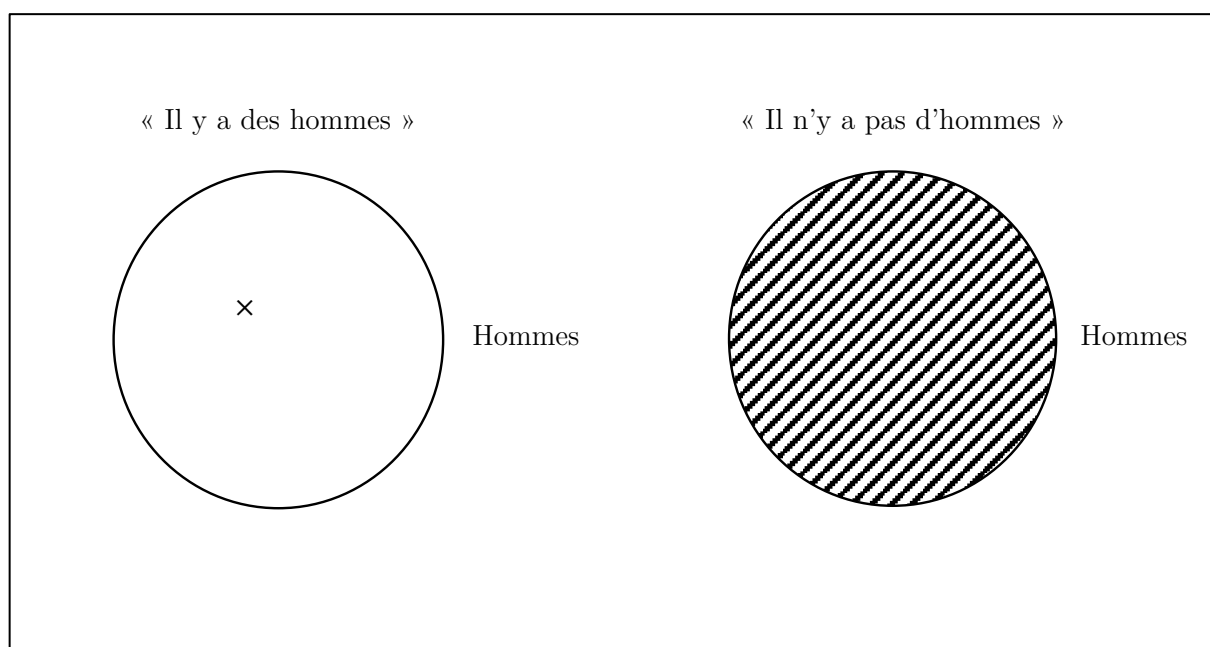


Figure 8 : Conventions interprétatives adoptées pour la lecture des diagrammes de Venn

D'après les prémisses suivantes :

Tous les Grecs sont des Hommes (1)

Tous les Hommes sont Mortels (2)

(1) implique que tous les Grecs qui ne sont pas des hommes sont barrés ; (2) implique que tous les hommes non mortels sont aussi barrés. On peut alors observer et déduire de la production du diagramme inférieur la conclusion suivante : « Tous les Grecs sont

Mortels ». Le diagramme terminal de la partie inférieure de la Figure 9 découle des translations spatiales qui matérialisent visuellement la production effective du résultat véridique. La vérité est produite au terme d'une série de transformations géométriques simples dont la matérialisation permet l'intuition contrôlée.

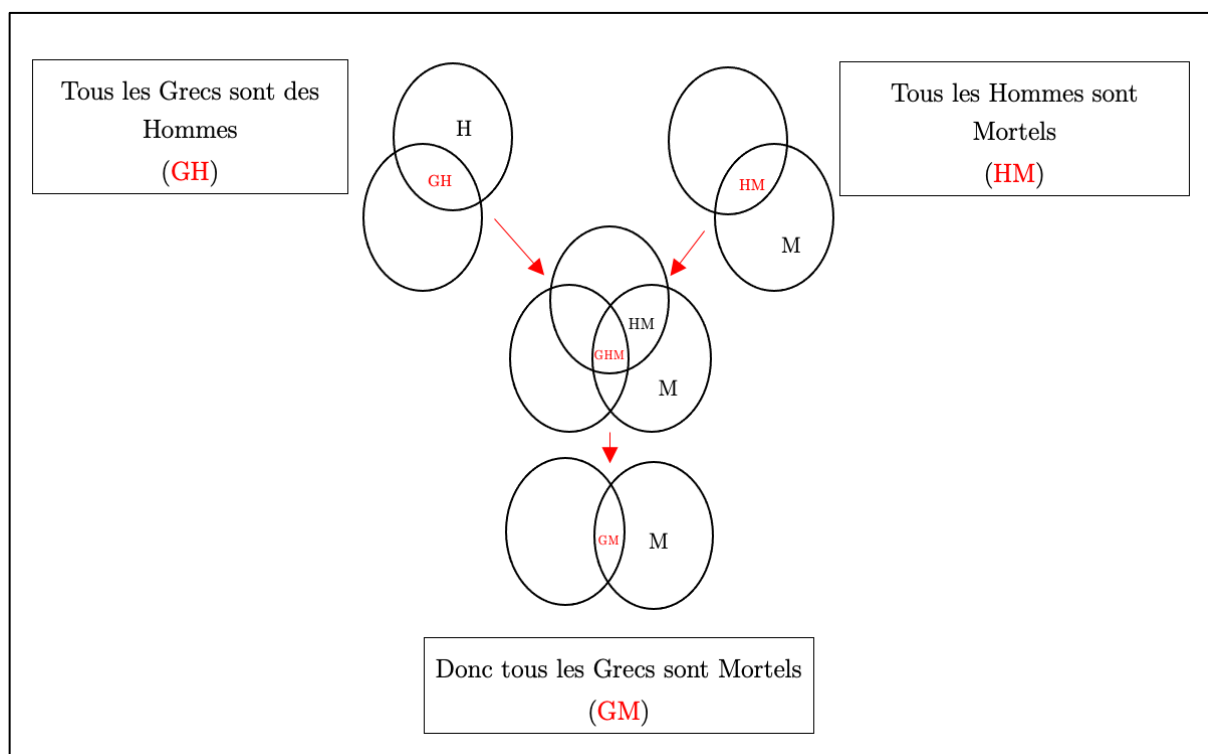


Figure 9 : Ancrage matériel du raisonnement diagrammatique

Étudier le mécanisme interne de l'inférence en représentant un ensemble de prémisses au moyen de diagrammes permet d'observer les transformations des prémisses en conclusion par une série d'étapes graphiques élémentaires dont la genèse est la suivante : 1° figuration géométrique des propositions logiques (Euler) ; 2° codage algébrique des classes d'attribution qui interviennent dans les raisonnements syllogistiques (Boole) ; 3° complétion diagrammatique du groupe de substitution des classes en question dans un schéma symbolique définissant une totalité fonctionnelle (Venn). Cet exemple permet d'illustrer la thèse suivante :

Le diagramme est une machine sémiotique qui fonctionne suivant des conventions interprétatives

Dans ce cas particulier, il s'agit d'une machine logique. Mais tout diagramme, même s'il possède une logique intrinsèque, n'est pas réductible à une machine logique. C'est ce qui en fait la richesse. Cela signifie que le niveau sémiotique excède le niveau logique, et qu'un diagramme est porteur d'un supplément d'intelligibilité rationnelle qui excède toute formalité logique.

PLAN DU CHAPITRE 2

Ce chapitre poursuit deux objectifs. Le premier est de présenter le cadre méthodologique du programme de recherche de l'ingénierie sémiotique et les fondements de la théorie de la connaissance qui lui sont sous-jacents, ceux de la théorie du support, qui est une théorie de l'inscription matérielle des connaissances. Le second est d'étudier trois classes de représentations graphiques (la figure, le schéma et le graphe) à travers l'analyse de quelques cas particuliers (figure picturale, schémas encyclopédiques, graphes orientés) et de quelques cas de pseudos et quasi-diagrammes (diagramme de flux, diagramme stratigraphique, diagramme commutatif) afin de caractériser le spectre des représentations infra-diagrammatiques.

**CHAPITRE 2. INGENIERIE SEMIOTIQUE ET
REPRESENTATIONS INFRA-DIAGRAMMATIQUES**

1. Intelligence artificielle réduite et ingénierie sémiotique

La discipline dans laquelle s'inscrit notre travail est l'ingénierie sémiotique : son objectif est de concevoir des systèmes diagrammatiques pour instrumenter la résolution de problèmes. Le problème posé par cette discipline est la diversité des savoirs auxquels elle doit recourir et la multitude des objets qu'elle est conduite à étudier car toute activité humaine est potentiellement concernée par son programme de travail. Nous la définirons en premier lieu comme une technique des supports de connaissances mobilisant les sciences de la culture pour comprendre les pratiques de résolution de problèmes mises en œuvre dans les pratiques scientifiques et techniques, mais aussi dans les pratiques ordinaires. Plus précisément, nous dirons que cette discipline élabore des dispositifs graphiques permettant d'instrumenter une résolution de problèmes en tant que cette résolution est médiatisée par la lecture et l'interprétation d'unités sémiotiques de manipulation, et cela à travers un type de raisonnement qu'elle suscite et permet de mettre en œuvre : le raisonnement diagrammatique.

L'ingénierie sémiotique s'inscrit dans la filiation de l'intelligence artificielle réduite (abrégée dès à présent en IA réduite), un programme d'intelligence artificiel distinct de ceux de l'intelligence artificielle forte et faible, dont la stratégie consistait à instrumenter la science informatique dans l'opérationnalisation automatique de tâches intelligentes. Mais à la différence de l'IA réduite, l'ingénierie sémiotique ne vise pas à instrumenter la science informatique. Elle vise à instrumenter les pratiques de résolution opérées par des êtres humains grâce à ces artefacts sémiotiques directement manipulables que sont les diagrammes. Reproduire une tâche requérant de l'esprit grâce à un dispositif technique, est-ce modéliser l'activité de l'esprit accomplissant une telle tâche ou est-ce simuler le comportement qu'il laisse apparaître ? Est-ce une simulation du processus effectif de fonctionnement de l'esprit qui l'accomplit ?

Les questions de l'IA réduite et ses enjeux étaient les suivants : quelles sont les connaissances mobilisées par un agent doté d'esprit dans le cadre d'une résolution de

problème (enjeu gnoséologique) ? Quel ordre de mobilisation une telle résolution nécessite-t-elle pour être accomplie (enjeu méthodologique) ? Quelle est la part de connaissance formalisable dans l'ensemble des connaissances phénoménologiques permettant de construire un modèle du système de connaissances exploitable par l'outil informatique (enjeu scientifique) ? Quel programme peut-on construire à partir des connaissances formelles tirées du modèle phénoménologique de résolution pour rendre automatique une partie de la résolution du problème, puisqu'un contenu phénoménologique n'est pas entièrement réductible à un contenu formel (enjeu technologique) ? Quels sont dès lors les contenus phénoménologiques à inférer à partir du résultat de la résolution approximée pour rendre complète la résolution du problème étudié (enjeu herméneutique) ?

L'IA réduite était une ingénierie qui se donnait pour tâche de résoudre des problèmes par ordinateur en considérant les programmes pour ce qu'ils font, à savoir résoudre des problèmes grâce à leur programmation et à leur opérationnalisation au sein de dispositifs informatiques. Elle ne traitait pas de tous les problèmes, mais seulement ceux d'une certaine classe. Quelle était cette classe de problèmes ?

L'IA réduite se concentrait sur la classe de problèmes mobilisant des connaissances phénoménologiques véhiculées par voie linguistique. Comme elle se donnait pour tâche d'exploiter les connaissances phénoménologiques de résolution grâce à l'informatique, elle mettait donc en œuvre des connaissances scientifiques pour traiter des problèmes posés en termes de connaissances phénoménologiques.

Par conséquent, l'IA réduite partait d'une certaine acception de la notion de problème, celle selon laquelle un problème n'est pas une difficulté qui nécessite la mobilisation d'une faculté supposée naturelle pour être résolu (l'intelligence), mais une situation qui nécessite la mobilisation de connaissances²⁵. Il est aisé de comprendre une

²⁵ Même si la mobilisation de connaissances implique de fait la mise en œuvre d'un comportement qu'on qualifie phénoménologiquement d' « intelligent ».

telle acception, si l'on garde en tête la précaution suivante suivie par l'IA réduite : s'abstenir de toute thèse préalable, *a priori*, sur la nature de l'intelligence ou esprit. En effet, si l'IA réduite n'avait pas décrit la résolution des problèmes en termes de connaissances, alors elle l'aurait décrite en termes de processus. Or décrire les résolutions en termes de processus, c'est poser tacitement une thèse sur la nature des connaissances : à savoir que ce sont des objets de l'ontologie scientifique, soit réductibles à des états physiques (selon la position physicaliste), soit réductibles à des états computationnels (selon la position computationnaliste). Décrire les résolutions en termes de processus, c'était réduire tacitement les connaissances à des opérations cognitives, donc à des actions automatiques formalisables algorithmiquement. Mais alors qu'est-ce qu'une connaissance se rapportant à un problème ?

Le seul moyen pour ne pas tomber dans le piège réductionniste tout en gardant une approche *véridique* de la connaissance consistait à considérer les connaissances pour ce qu'elles sont dans notre plus familière quotidienneté : des contenus phénoménologiques véhiculés par des idiomes linguistiques. Le pas supplémentaire opéré par l'ingénierie sémiotique consiste à adjoindre au savoir véhiculé par les énoncés linguistiques des représentations graphiques porteuses d'un contenu cognitif qui le complète. Dans cette perspective, l'IA réduite devient selon nous une ingénierie sémiotique lorsqu'elle vise à articuler rigoureusement les idiomes des langues naturelles aux contenus des représentations graphiques non linguistiques afin de donner accès aux contenus perdus par le formalisme comme principe de modélisation des connaissances, dès lors que ce principe est mis en œuvre.

1.1 La phénoménologie de la connaissance de Peirce : un guide méthodologique

Pour se délester de tout préjugé théorique et de toute posture dogmatique, nous n'avons pas d'autre choix, pour décrire les problèmes informels immédiats, familiers et quotidiens, que de partir en quête d'une phénoménologie de la connaissance, dans l'attention à ce que nous donne à voir l'évidence de la pratique comme savoir-faire mobilisant des connaissances tacites (qui se donnent à voir dans des tours de main et des gestes silencieux) et des connaissances explicites (qui se donnent à écouter dans des expressions linguistiques). Cette pratique du faire et du dire, dans ses expressions tacites et explicites, c'est-à-dire ses extériorisations apparentes, donc descriptibles, est donc ce qui autorise une phénoménologie publique, pouvant faire l'objet d'une étude commune soumise à la délibération collective.

Dans sa quête d'une phénoménologie de la connaissance, l'IA réduite trouvait dans la phénoménologie de la connaissance élaborée au début du 20^e siècle par C. S. Peirce un programme de recherche pertinent ayant pré-tracé une méthodologie pouvant également servir de guide à une ingénierie sémiotique préoccupée d'instrumenter la résolution de problèmes informels mobilisant des connaissances phénoménologiques.

L'ingénierie sémiotique, comme son nom l'indique, vise à instancier la problématique de l'intelligence artificielle dans un cadre sémiotique, mais sans avoir recourt aux artefacts informatiques. L'intelligence est une notion multiforme, qui peut recevoir des définitions multiples, plus ou moins arbitraires et chargées de présupposés, voire de préjugés. Afin de limiter les décisions et présupposés arbitraires pour questionner cette manifestation comportementale, il nous faut donc partir du dispositif théorique qui a été mis en place par Peirce, en l'enrichissant d'une compréhension technique des formats de représentations graphiques, afin d'articuler les représentations linguistiques aux représentations non linguistiques.

En réponse et en réaction à la doctrine kantienne des catégories, Peirce a en effet construit un dispositif théorique au fondement d'une phénoménologie de la connaissance, dénommée dans sa terminologie *phanéroskopie*. La phanéroskopie traite des *phanérons*, qui désignent les modalités de présence du réel à un esprit. Elle ne présuppose rien sur la nature de l'esprit en question ni sur le soubassement ontologique de la réalité. On peut dire que cette démarche marie admirablement la prudence d'un empirisme sceptique (comme celui de Hume) au regard attentif d'une phénoménologie braquée sur ce qui est donné en présence comme un *ceci senti* (*i.e.* un contenu intuitif porteur de sens) pouvant être transformé en un *ce que pensé* (*i.e.* un contenu conceptuel catégorisant ce sens). Dans le cadre de l'ingénierie sémiotique, le formatage sémiotique du contenu intuitif porteur de sens procède conjointement par *schématisation graphique* (à travers des représentations graphiques non linguistiques) et *catégorisation conceptuelle* (à travers des représentations graphiques linguistiques) comme nous le montrerons plus loin.

La phénoménologie de la connaissance de Peirce est une phénoménologie du signe sans sujet présupposé (substance) ni objet présupposé (chose en soi). Suivant cette phénoménologie, toute réalité ontologique est réduite à un signe manipulable porteur de sens. De plus, tout ce qui est une unité sémiotique manipulable est spirituel, à partir du moment où le signe devient le relais d'une activité interprétante. Cette dynamique, vectorisée par des inférences et rebondissant de signes en signes, Peirce la nomme « sémiosis ». La sémiosis est la dynamique potentiellement indéfinie qui transporte l'esprit de signes en signes. La coupure sémiotique de ce processus est marquée par l'acte, dans la mesure où l'acte est ce qui arrête le processus interprétatif de la sémiosis pour faire entrer l'interprétant humain dans l'ordre pragmatique de l'action et de la pratique, qui est l'ordre de la finitude existentielle. Au mouvement indéfini de l'interprétation vient donc s'opposer la finitude de l'action, qui est décision d'interprétation s'actualisant comme opération effective. Interpréter dans le cadre de l'ingénierie sémiotique signifie donc accomplir la ou les opérations techniques dont des systèmes de signes schématisent

les modes opératoires. Ces opérations sont guidées grâce à des conventions permettant de contrôler la lecture des schémas afin qu'ils soient actualisés analogiquement par celui qui les manipule en les lisant. Cette actualisation analogique s'effectue, comme nous le montrerons plus loin, à travers le schématisme pratique du raisonnement opéré au cours de la manipulation de cette machine sémiotique qu'est un diagramme. Tout l'enjeu de l'ingénierie sémiotique consiste à schématiser les opérations non calculables de l'expérience pour les modéliser, à les catégoriser linguistiquement pour les analyser et à les expliciter discursivement pour les caractériser, afin qu'elles puissent être mises en œuvre par des agents sémiotiques intelligents. Car il s'agit de transformer le contenu dont sont porteuses ces opérations non calculables stabilisées graphiquement en des outils cognitifs prescripteurs de leur bonne manipulation. Autrement dit, la bonne manipulation sémiotique est celle qui permet la reproduction des opérations dont les symboles graphiques sont les schémas, et que doivent mettre en œuvre les sujets interprétants qui les manipulent. Suivant la méthodologie sémiotique, l'association des idées n'est plus commandée par des principes de la nature (ressemblance, contiguïté, causalité), mais par des inférences opérées entre des signes. Ce qu'ajoute l'ingénierie sémiotique, ce sont des conventions interprétatives permettant de systématiser les relations reliant la connaissance à l'action via la manipulation de signes graphiques porteurs de sens.

1.1.1 Les catégories de l'être selon Peirce

Peirce distingue ainsi trois catégories de *phanérons* : 1° la *priméité* ou être du fait dans sa particularité qualitative (par exemple du rouge) ; 2° la *secondéité* ou être du fait brut actuel, qui implique l'action réciproque entre deux êtres dans l'ordre d'une causalité mécanique (par exemple les ondes sonores qui font vibrer le tympan) ; 3° la *tercéité* ou être de la loi déterminant un fait à venir, c'est-à-dire l'être d'un troisième qui permet à un premier d'interagir avec un second. La *tercéité* est la catégorie de la causalité finale, donc celle de l'intelligence. Pourquoi ?

Parce qu'elle est la mobilisation d'un troisième (détour, moyen, représentation, médiation instrumentale, méthode, etc.) par un premier (sujet) vis-à-vis d'un second (objet, obstacle, danger, finalité à atteindre, problème à résoudre). En effet il y a intelligence dès qu'il y a médiation d'un moyen. L'intelligence suppose donc : 1° la représentation d'un objet ou d'une situation plus ou moins complexe faisant obstacle (problème) ; 2° la représentation du ou des moyens à mettre en œuvre pour le lever et le dépasser (intermédiaires) ; 3° la représentation de la fin à atteindre (la représentation de la solution comme résolution du problème). La représentation de cette fin est d'ailleurs porteuse de l'information rétroagissant dans une causalité récurrente sur l'être intelligent en voie de résolution : elle rétroagit continûment sur l'agencement des moyens mis en œuvre dans le processus de recherche, de telle sorte qu'il coïncide adéquatement avec le contenu de la fin visée en lui étant pleinement ajusté. Tout phénomène qui manifeste un comportement ressortissant de la tercité, quel que soit son degré de complexité, peut donc être qualifié d'intelligent.

Or l'ingénierie sémiotique est la construction de la tercité à travers l'agencement d'unités sémiotiques manipulables porteuses de sens (les catégories de composantes diagrammatiques) dans des systèmes de signes dont la mise en fonctionnement, à travers leur lecture, permet de mettre en œuvre la faculté de « diagrammatisation » (Giardino), qui est la capacité à coordonner des processus perceptifs, moteurs et inférentiels, et dont les diagrammes sont à la fois les supports matériels (en tant que schémas graphiques légendés) et les méthodes génératives (en tant qu'outils cognitifs prescriptifs).

Autrement dit, la tercité est la catégorie de l'interdépendance contrôlée, donc celle de la connaissance, puisqu'un problème est ce qui exige des connaissances pour être résolu. La tercité authentique est la catégorie de la connaissance effective (du côté du sujet interprétant) et la tercité constatée, la catégorie de l'intelligence objective (du côté des phénomènes observés). La tercité authentique est ce qui permet une objectivation du mental à travers des signes matérialisant les connaissances. La tercité constatée est

quant à elle la condition de possibilité d'une phénoménologie de l'intelligence, puisqu'elle manifeste la logique des relations sémiotiques. C'est pourquoi Peirce voyait par exemple dans le comportement d'une grenouille soumise à une expérimentation scientifique l'opérativité concrète d'un syllogisme incarné²⁶. En identifiant la pensée à un signe et l'opération intelligente à une inférence entre des signes, on peut donc associer à toute sémiotique une logique matérielle dynamique autorisant une phénoménologie de la connaissance et de l'intelligence, à partir du moment où un phénomène (ou *phanéron* dans le langage de Peirce) répond au critère de la tercité. C'est ce fait qu'exploite l'ingénierie sémiotique en tant qu'ingénierie de la connaissance, c'est-à-dire ingénierie de la tercité.

1.1.2 IA réduite : objet, méthode, principes

Le signe linguistique est le plus couramment utilisé dans l'expression et la transmission des connaissances phénoménologiques du fait de sa facilité de manipulation et de sa rapidité de transmission dans l'échange intersubjectif. C'est pourquoi l'IA réduite avait pour objet les connaissances phénoménologiques telles qu'elles sont exprimées à travers les formulations linguistiques. Elle n'avait pas pour objet l'ensemble des signes exprimant des connaissances, mais l'expression des connaissances telles qu'elles sont véhiculées par le médium linguistique.

Le projet de l'ingénierie sémiotique est de compléter l'IA réduite d'unités sémiotiques manipulables non linguistiques, afin d'autoriser le raisonnement diagrammatique, de telle sorte que le traitement de l'information ne soit plus exclusivement porté par des machines computationnelles virtuelles, mais par les machines

²⁶ B. Bachimont, « L'artéfacture entre herméneutique de l'objectivité et de l'intersubjectivité : un projet pour l'intelligence artificielle », in J.-M. Salanskis, F. Rastier et R. Sheps (dir.), *Herméneutique : textes, sciences*, Paris, Presses universitaires de France, 1997, p. 301-330. Sur la question des couplages inférentiels induits par l'ancrage matériel des raisonnements, voir : E. Hutchins, « Material anchors for conceptual blends », *Journal of Pragmatics*, vol. 37, n° 10, 2005, p. 1555-1577.

sémiotiques vivantes que nous sommes en tant qu'êtres interprétants des signes manipulables porteurs de sens.

L'objectif de l'IA réduite était en effet de réaliser des systèmes informatiques à base de connaissances dont la fonction est d'opérationnaliser des connaissances phénoménologiques exprimées linguistiquement en mettant en œuvre une méthodologie formaliste régit par deux principes²⁷, dont le premier a été dégagé par les membres du Cercle de Vienne (principe de modélisation) et le second par la logique mathématique telle qu'elle s'est accomplie dans la mécanisation du raisonnement, grâce aux travaux de Turing (principe d'effectivité). Le principe de modélisation indiquait en quoi le système opérationnel de connaissances est un modèle du problème traité ; le principe d'effectivité précisait en quoi le modèle du problème était opérationnel, c'est-à-dire en quoi l'opérationnalisation du modèle dans le dispositif informatique qui le mettait en œuvre renvoyait à l'effectivité du réel que le modèle implémenté simule.

L'IA réduite, comme ingénierie des connaissances véhiculées par des représentations linguistiques, adoptait donc une méthode formaliste en ayant recourt à une conception logiciste de la connaissance (le formalisme comme principe de modélisation) et à une conception calculatoire de la logique (le formalisme comme principe d'effectivité)²⁸. Adopter une conception logiciste de la connaissance, c'est en effet considérer que le contenu gnoséologique véridique d'une expression linguistique équivaut à sa structure formelle. Dans cette perspective, les concepts du sens commun ont le même statut que les concepts de la science. Ce qui fait leur communauté, c'est le fait que leur contenu est réductible à une structure formelle, à la relation formelle qui le structure. Dès lors, pour extraire les connaissances véhiculées par les expressions linguistiques du langage naturel, il suffisait de dégager la structure formelle de ces expressions. En concaténant ces

²⁷ B. Bachimont, « Intelligence artificielle et écriture dynamique : de la raison graphique à la raison computationnelle », in J. Petitot & P. Fabbri (dir.), *Au nom du sens*, Paris, Grasset, 2000, p. 290-319.

²⁸ B. Bachimont, *ibid.*

structures dans le langage canonique de la connaissance, la logique formelle, on pouvait alors construire un système formel de représentation du contenu gnoséologique véhiculé par les connaissances phénoménologiques exprimées linguistiquement, et ainsi construire un modèle du problème dont ces connaissances phénoménologiques sont les connaissances de résolution. Or comme tout système formel est mécanisable sur une machine de Turing, tout système formel est opérationnel dans la mesure où toutes les opérations du système sont exécutables par une machine de Turing. C'est la raison pour laquelle le formalisme computationnel donnait à l'ingénierie des connaissances le principe d'effectivité dont elle avait besoin.

Si le principe d'effectivité ne posait pas de problème, en revanche, le principe de modélisation, lui, en posait un. En effet, opérationnaliser le modèle formel du système de connaissances phénoménologiques supposait d'avoir dégagé des primitives, qui résultaient d'une interprétation de leur sens dans le contexte phénoménologique irréductiblement singulier à partir duquel elles étaient extraites. Cela voulait dire que la formalisation du système de connaissances n'était pas une modélisation au sens fort, mais une construction procédant d'une modélisation préalable ayant fixé le sens des primitives du modèle. Dit autrement : ce qui devenait invariable pour le modèle formel devenait variable du point de vue du contexte de résolution, puisque chaque contexte de résolution était reconnu comme un contexte d'interprétation irréductiblement singulier.

1.1.3 L'exemple du concept de fonction dans le cadre de la modélisation de connaissances médicales

Par exemple²⁹, si nous mettons l'ingénierie au service de la médecine afin de modéliser, grâce au formalisme des graphes conceptuels (introduit par John F. Sowa), des connaissances médicales telles que « Le Logroton contient de la chlortalidone » (a) et « La chlortalidone a une fonction diurétique » (b) :

[Logroton] – (contient) --> [chlortalidone] (a)
 [chlortalidone] – (a_pour_fonction) --> [fonction_diurétique] (b)

À partir de la règle d'inférence suivant laquelle un médicament a la fonction de son composant actif, on aimerait en déduire que :

[Logroton] –
 (contient) --> [chlortalidone]
 (a_pour_fonction) --> [fonction diurétique] (1)

Mais comme il s'agit d'un formalisme logique et que dans un tel formalisme si A et que $A \Rightarrow B$ alors on peut affirmer B ($A, A \Rightarrow B \vdash B$), on en déduit donc, en supposant que la vérité du graphe conceptuel (1) se transmet à celle du graphe conceptuel (2), que :

[Logroton] – (a_pour_fonction) --> [fonction diurétique] (2)

Or cela n'est pas vrai dans le domaine modélisé car dans le contexte de (1) la notion de fonction signifie la fonction biochimique du composant actif alors que dans le contexte de (2) sa signification renvoie à la fonction thérapeutique du médicament. En effet le Logroton est un antihypertenseur qui porte en lui la fonction biochimique diurétique (favoriser la sécrétion urinaire) pour accomplir sa fonction thérapeutique (faire baisser la

²⁹ L'exemple que nous paraphrasons se trouve dans : B. Bachimont, « Intelligence artificielle et écriture dynamique : de la raison graphique à la raison computationnelle », art. cit.

tension artérielle). Cet exemple montre bien que les termes fondamentaux utilisés par le système formel ne sont pas des notions primitives univoques comme l'imposerait le formalisme, mais des termes linguistiques dont la signification est contextuelle, c'est-à-dire surdéterminée par un point de vue. La notion de fonction signifie par défaut la fonction thérapeutique, mais dans le contexte du composant actif, elle signifie l'effet physiologique qu'il produit.

Cet exemple permet de comprendre les limites de la formalisation, car il démontre que le sens des formules produites par la syntaxe générative du système n'est pas adéquat à la signification contextuelle saisie par les opérations interprétatives d'un agent mis en situation. Pourtant ce sens est interprétable, car le symbolisme des systèmes formels prolonge celui de la langue naturelle. La conséquence en est que le système formel, opérationnalisé dans un dispositif informatique dont la puissance calculatoire surpasse celle des opérations cognitives conscientes d'un être humain, peut conduire à la production de nouveaux énoncés porteurs de nouvelles connaissances médicales.

La question devenait donc la suivante : en quoi et comment un dispositif informatique peut-il produire du sens ? En abordant cette question du point de vue des technologies cognitives, cela signifiait qu'il ne fallait plus considérer l'ordinateur comme un outil de modélisation, mais comme un nouveau support d'inscription des connaissances. Au même titre que l'écriture graphique n'est pas un *modèle* du monde, et le monde, un *livre* écrit en langage mathématique (selon la belle métaphore de Galilée), les systèmes formels automatiques révélaient grâce à la mise en œuvre du programme de l'IA réduite qu'ils ne sont pas des modèles des domaines de connaissances, mais des supports virtuels opératoires et calculatoires qui véhiculent des connaissances et permettent d'en constituer de nouvelles. C'est cette découverte qui autorisa le développement d'une critique du formalisme en intelligence artificielle, le programme d'une ingénierie des connaissances et l'élaboration d'une critique de la raison computationnelle par Bruno Bachimont.

1.2 Intelligence, problème et connaissances : herméneutique des supports

La notion centrale de notre propos est celle d'intelligence. Cette disposition, pour être pensée de façon productive, abstraction faite de tout présupposé naturaliste, comme une catégorie de la pratique et une manifestation comportementale impliquant la causalité finale, doit être pensée en dualité avec une seconde notion : celle de problème. Un problème, de quelque nature qu'il soit, est ce qui éveille l'intelligence, car il est ce qui bloque l'activité et contraint à devoir prendre des initiatives et des décisions pour se libérer de l'obstacle et le dépasser. Enfin, pour que cette dualité puisse être pensée comme une tension effective, il faut l'inscrire dans une activité dont l'enchaînement n'est pas prédéfini, puisque toute solution à un problème suppose une recherche de solution, donc un cheminement entre l'événement-problème et l'événement-solution, c'est-à-dire un temps de réponse au cours duquel des objets et des opérations intermédiaires vont être interprétés, choisis et exécutés en fonction du retour d'information induit par l'écart mesuré entre l'actualité des données du problème et la virtualité des données réordonnées dans la représentation de la solution. Cet enchaînement non prédéfini qu'est la résolution du problème comme recherche d'une solution suppose :

- une collecte des données du problème, c'est-à-dire une intuition de ses éléments constitutifs. Elle est de l'ordre de la priméité au sens de Peirce.
- Une saisie des relations entre les données du problème afin de les réordonner en vue d'une solution. Cette saisie est de l'ordre de la secondéité.
- La schématisation et la catégorisation des données pertinentes au moyen d'un code d'enregistrement. Cette schématisation et cette catégorisation permettent de transformer les données pertinentes en connaissances symboliques manipulables, communicables et transmissibles, grâce à ces vecteurs sémiotiques de connaissances que sont les schémas légendés. Cette schématisation et cette catégorisation correspondent à un codage sémiotique. Le codage linguistique des données pertinentes produit des *connaissances conceptuelles* (qui renferment les

informations relatives aux données du problème) ; le codage des opérations réelles non calculables produit des *connaissances opératoires* (qui renferment les informations relatives aux transformations à opérer sur ces données). Appliquer le code des transformations sur le code des données du problème est ce qui permet de produire son diagramme de résolution : le diagramme de résolution est alors le codage sémiotique de la résolution du problème. Tout le problème de la méthode dans le cadre d'une résolution de problème consiste d'une part à rendre communicable l'ensemble des connaissances nécessaires à sa résolution ; d'autre part à rendre démonstratif l'ordre d'enchaînement des transformations à opérer sur le contenu de ces connaissances.

Repartons de la notion de problème. Un problème est ce qui requiert des connaissances pour être résolu. Mais toute connaissance ne devient objective qu'à partir du moment où elle est inscrite matériellement. Un problème objectif est donc ce qui requiert des connaissances objectives, c'est-à-dire des connaissances inscrites matériellement, ayant un support technique d'inscription et un substrat phénoménologique de manifestation.

Or est technique tout support matériel détachable, individualisable et manipulable dans le cadre d'une résolution de problème, car servant de moyen entre le problème posé et le sujet confronté au problème. Un problème objectif est donc ce qui requiert des connaissances interprétables et des techniques manipulables par un sujet problématisant, c'est-à-dire en voie de résolution. Par conséquent, toute connaissance objective est d'essence technique, car l'inscription de la connaissance est sa mémoire objective, et parce que toute inscription suppose un support matériel d'objectivation.

Or comme la technique est d'emblée un support de mémoire³⁰, il faut donc distinguer la technique comme *support* de mémoire sui generis (autorisant alors une archéologie du support) du *substrat* d'inscription de la connaissance qu'elle supporte (autorisant alors

³⁰ B. Stiegler, *La technique et le temps, 1. La Faute d'Épiméthée*, Paris, Galilée, 1994.

une phénoménologie du substrat). L'archéologie du support renvoie à son histoire causale, tandis que la phénoménologie de son substrat renvoie à la logique sémiotique des signes inscrits qu'il supporte, les signes inscrits étant les manifestations des connaissances que le support transporte.

Mais lorsque le support des connaissances est l'environnement, les connaissances correspondent aux actions possibles ouvertes par les brèches et les saillances objectives qu'il propose au corps agissant. Les inscriptions correspondent alors aux possibilités d'action du corps situé dans un environnement, dont les contours, motifs et formes (constituant sa configuration située) sont les contraintes objectives d'insertion, rendant possible des frayages³¹.

Une *connaissance* est donc ce qui permet d'avancer dans la résolution d'un problème en permettant de réaliser une action : 1° grâce à une possibilité objective offerte par l'environnement où se pose le problème ; 2° grâce à son appropriation sémiotique via des supports techniques d'inscription (cette appropriation impliquant une décision d'interprétation et donc une coupure sémiotique, par un saut dans l'ordre pragmatique et pratique). Une *technique* est quant à elle ce qui prescrit une action potentielle, puisque toute technique est d'emblée un support de mémoire, donc d'une trace causale, signe d'une action potentielle, donc répétable.

Dès lors on peut distinguer les « techniques qui programment le geste » et les « techniques qui programment la reformulation³²», ainsi que trois approches herméneutiques que leurs sont associées :

- une herméneutique implicite, antérieure au langage verbal et sensible aux singularités informatives du schéma corporel. C'est l'activité interprétative qui

³¹ Voir sur cette question par exemple : J. J. Gibson, *Approche écologique de la perception visuelle*, Bellevaux, éditions Dehors, 2014 ; et sur la théorie du support en général : B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique*, *op. cit.*

³² B. Bachimont, « Du texte à l'hypotexte : les parcours de la mémoire documentaire », in C. Lenay et V. Havelange (dir.), *Mémoire de la technique et techniques de la mémoire*, Toulouse, Érès, 1999, p. 195-225.

saisit le sens du schéma corporel dans son rapport à l'environnement qui lui est immédiat.

- Une herméneutique « complicité », contemporaine des gestes producteurs des objets techniques, et réceptive aux structures saillantes de leurs usages, comme aux schèmes opératoires de leur fonctionnement. C'est l'activité interprétative qui saisit le sens des objets techniques utilisés par notre corps dans des contextes d'utilisation.
- Enfin une herméneutique explicite produite par toutes les réflexivités. Elle est postérieure aux deux précédentes au sens où elle en explicite les savoir-faire tacites sous forme de méthodologies scripto-visuelles.

On peut donc dégager trois types de connaissances, adjoints à ces trois types d'intelligence herméneutique :

- les connaissances implicites impliquées dans l'action résolutive, qui ont pour support le corps propre et l'environnement immédiat.
- Les connaissances « complicités » impliquées dans la relation aux artefacts, au sens où ces connaissances co-impliquent une connaissance intime des cohérences interne, concrète et externe de ces artefacts.
- Les connaissances explicites, formulées dans des langues naturelles et artificielles, à travers des énoncés linguistiques et des représentations graphiques non linguistiques.

On a donc affaire à plusieurs catégories de support possibles dans le cadre d'une activité de résolution de problème : support environnemental, support corporel, support technique. Le support environnemental indique des actions possibles. Le support corporel mémorise organiquement des actions réalisées sous forme de schèmes comportementaux, de diagrammes opératoires de pratiques systématisées, qui ont été intériorisés au cours de notre évolution épigénétique, scandée par nos diverses expériences et apprentissages. Enfin le support technique, qui mémorise sous formes d'objets utilisables et de signes

manipulables des connaissances extériorisées dans une matière symbolique formatée et codifiée. La technique devient ainsi une catégorie de la connaissance qui n'est plus seulement descriptive, mais prescriptive. Elle renvoie à une opération qui n'est plus seulement possible, mais potentielle.

Résoudre un problème, c'est donc : 1° réaliser des opérations possibles grâce à des connaissances ; 2° interpréter des supports techniques qui prescrivent la réalisation d'opérations potentielles ; 3° actualiser une opération virtuelle par invention. Compréhension logique, interprétation technique et invention imaginative permettent ainsi de nous débarrasser du problème, c'est-à-dire de contourner l'obstacle (résolution méthodologique), de le lever (résolution pratique avec ou sans médiations instrumentales) ou de l'intégrer (concrétisation techno-génétique).

2. Processus de schématisation et catégories de représentations infra-diagrammatiques

Si l'on souhaite élaborer une théorie des formes graphiques pour enrichir les conceptions du langage et de l'écriture dont nous héritons du siècle dernier, il faut critiquer et dépasser le présupposé implicite qui a été au principe des pensées structuraliste et poststructuraliste qui ont dominé la seconde moitié du 20^e siècle. Ce présupposé logocentriste, qui donne un primat au contenu linguistique et à la formalité logique qui en dérive, nous pouvons le formuler de la manière suivante, pour le rendre explicite et discutable : *toute connaissance peut se réduire à sa formulation linguistique et à sa forme logique.*

C'est en analysant les pratiques graphiques à l'œuvre dans les domaines de production des connaissances et des savoir-faire que l'on peut comprendre le rôle cognitif et pragmatique que jouent les représentations graphiques dans notre vie, aussi bien théorique que pratique. Nous proposons l'analyse de trois types de représentations graphiques (la figure, le schéma, le graphe) à partir de quelques analyses de cas afin de

pouvoir placer ces différentes formes sur le spectre de l'infra-diagrammatique. Dans un premier temps, nous analysons la différence entre une figure et un schéma, dans un second temps, la différence entre un schéma et un graphe.

2.1 Figure et schéma

Le schéma est une figure sans ornement : c'est un modèle simplifié qui permet de représenter un objet ou un processus pour en comprendre les parties ou les moments essentiels. Pour devenir un diagramme, le schéma ne doit pas simplement conserver une homologie de structure avec ce dont il est le schéma. Il doit être supplémenté d'une propriété : la générativité. Il doit donc être potentiellement producteur et reproducteur d'autre chose que ce qu'il représente. Une question se pose : comment le peut-il ? C'est-à-dire : quelles sont les conditions qui permettent de transformer le schéma en diagramme ? Autrement dit : de quoi le schéma doit-il être supplémenté pour être transformé en un diagramme permettant de produire un supplément qui caractérise la différence entre un schéma et un diagramme ? Quelle est la nature de ce supplément ? S'agit-il d'un supplément d'intelligibilité ?

2.1.1 Dimension spatiale du schéma

Nous avons donné comme première définition extrêmement générale et approximative du schéma : « figure sans ornement ». Le schéma est donc une espèce du genre figure : il est en quelque sorte le squelette dont la figure est la chair. C'est une bonne métaphore pour décrire spontanément le rapport du schéma à la figure. Car le schéma dé-densifie la figure : il la dé-sature. On peut même dire qu'en la dé-saturant, il en révèle l'ossature.

Cette ossature a deux caractéristiques : elle conserve la forme apparente de la figure mais elle la dépossède simultanément d'un certain nombre de propriétés. Par exemple *L'Homme de Vitruve* de Léonard de Vinci (Figure 10) est un dessin qu'on peut considérer

comme une représentation picturale du corps humain. En tant que représentation picturale, c'est une figure du corps humain :

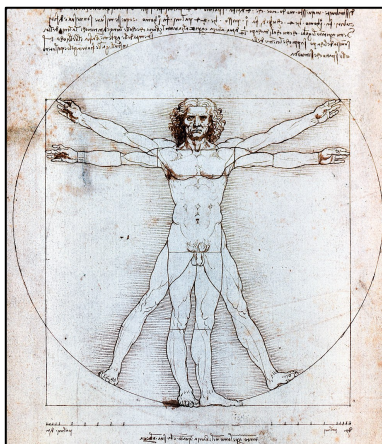
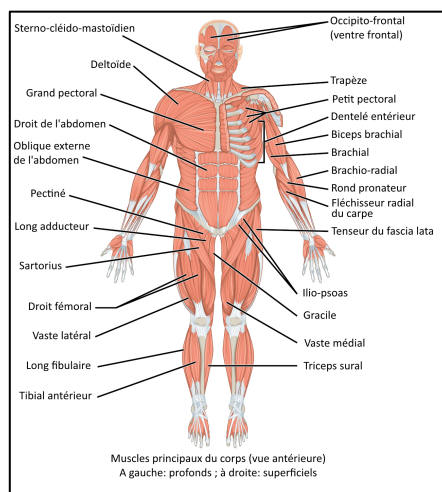
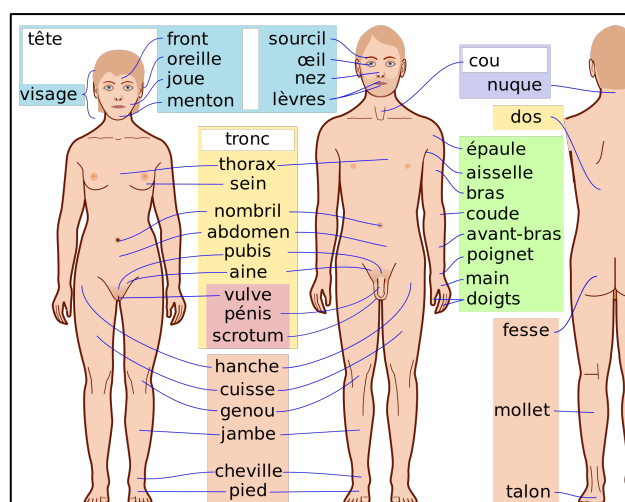


Figure 10 : *L'Homme de Vitruve* de Léonard de Vinci³³

Mais la représentation du même corps, abstraction faite de sa peau, c'est-à-dire construite afin de représenter ses différentes parties internes, si elle est accompagnée d'une légende (permettant de dénommer les différentes parties constituantes du corps) et de flèches (permettant de les identifier une à une), alors elle devient un schéma. Ce peut être un schéma construit en vue de se faire une représentation des différents muscles du corps humain (Figure 11) ou une représentation des différentes parties du corps chez l'homme et la femme (Figure 12) :

³³https://fr.wikipedia.org/wiki/Homme_de_Vitruve#/media/Fichier:Vitruvian_Man_by_Leonardo_da_Vinci.jpg

Figure 11 : Schéma du corps humain³⁴Figure 12 : Schéma des corps de la femme et de l'homme³⁵

Deux opérations découpent donc la figure en schéma : la distinction des parties de la figure et leur dénomination une à une. On peut ainsi donner une première définition de la figure :

Une figure est une représentation synthétique et synoptique, plus ou moins dense et saturée, dont le schéma est la simplification et l'explicitation

³⁴https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_muscles_du_corps_humain

³⁵https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b1/Human_body_features-fr.svg/1920px-Human_body_features-fr.svg.png

Si le schéma conserve la proportion des rapports de distance entre les différentes parties de la figure qu'il représente, on dit qu'il en respecte les relations métriques. S'il respecte les relations métriques de la figure, il en respecte par définition les relations topologiques (rapports de position). Mais la réciproque n'est pas vraie : le schéma peut respecter les relations topologiques sans respecter les relations métriques, comme en témoigne par exemple ce schéma d'une cellule végétale (Figure 13) :

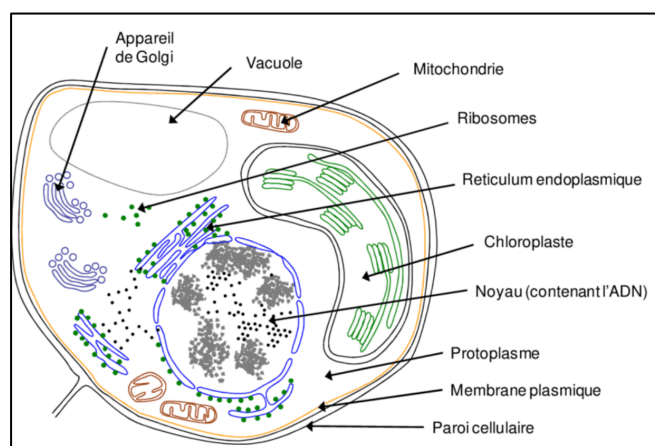


Figure 13 : Schéma d'une cellule végétale³⁶

De plus, un schéma peut respecter les relations métriques et les relations topologiques des éléments de la figure qu'il représente sans nécessairement respecter les échelles relatives entre ces éléments (voir Figure 14). Lorsque le schéma respecte les proportions entre les relations métriques des éléments qu'il représente suivant un facteur d'échelle, le schéma devient une carte :

³⁶https://www.researchgate.net/figure/Schema-dune-cellule-vegetale-dapres-Hopkins-Hopkins-1995-et-Gallien-Gallien_fig2_42100266



Figure 14 : Carte de la France³⁷

Nous venons de présenter la dimension spatiale du schéma comme *représentation graphique*.

2.1.2 Dimension temporelle du schéma

Mais le schéma peut aussi avoir une dimension et une signification temporelles : c'est le schéma au sens du *schéma comportemental*, l'ensemble perceptible des rapports constants que laisse apparaître une conduite répétée. Cette dimension temporelle conduit d'ailleurs le schéma à se transformer en schème. Car la dimension temporelle est aussi celle qui introduit le mouvement du schéma au sein d'un processus moteur. En ce sens, le schéma devenant schème est une figure du corps en mouvement : c'est la figure d'un comportement qui se manifeste de façon répétitive, suivant une certaine constance et une certaine fréquence dans le temps, à travers des mouvements s'exprimant par des actions et des manières de faire.

Si dans sa dimension spatiale le schéma est à la figure ce que le squelette est à la chair, quels sont les analogues temporels de la figure et du schéma ? Quelle image

³⁷https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/France_blank.png

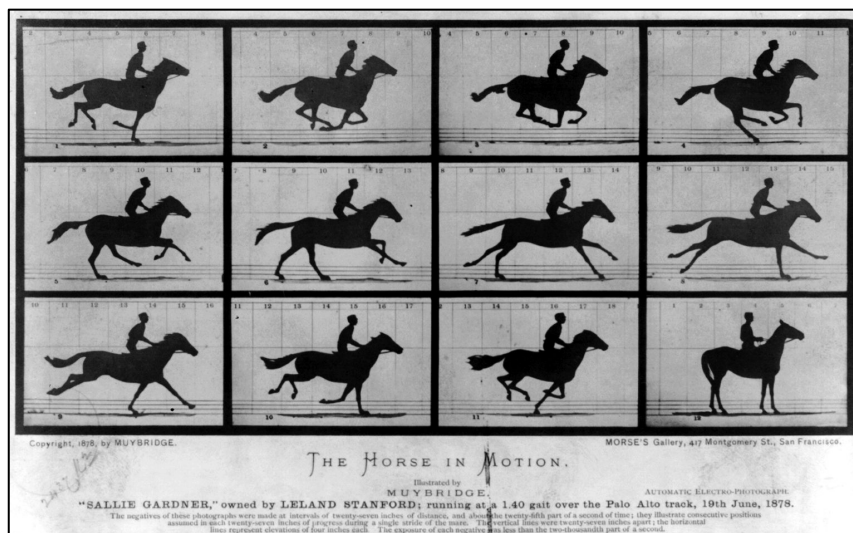
pourrait nous donner une représentation figurative du rapport des analogues temporels de la figure spatiale et du schéma spatial ?

On peut dire que le schème est à l'action ce que le schéma est à la figure. C'est une dédensification et une désaturation de la complexité de l'action dans son épaisseur temporelle. Nous posons donc :

$$\frac{\text{Figure}}{\text{Schéma}} \equiv \frac{\text{Action}}{\text{Schème}}$$

L'action est ainsi posée comme une figure du temps, dont le schème est l'abstraction, c'est-à-dire le schéma. Nous pouvons dès lors poser la question suivante : comment peut-on représenter le schème à travers un schéma spatial ? Autrement dit : comment peut-on représenter le schéma temporel d'une action, c'est-à-dire son schème, à travers un schéma spatial ?

Si on décompose l'action comme on décompose la figure dans le schéma figuratif, alors les segments de l'action considérée comme une totalité en constituent les parties temporelles. Si chaque segment partiel d'une action est représenté par une figure, alors il est possible d'extraire les schémas représentatifs des moments de l'action décomposée. Le principe de cette décomposition nous est donné par la technique de la chronophotographie :

Figure 15 : Chronophotographie³⁸

La représentation spatiale d'un schème au sens défini plus haut se présente donc comme la sériation ordonnée d'un nombre fini de schémas. Si le schème désigne l'ensemble des rapports entre différents points du temps définissant les extrémités des segments d'une action entière et totale, alors il est possible de projeter ces points dans un espace de configuration pour en obtenir un schéma spatial. Cela conduit à l'idée de la représentation de moments temporels grâce à la disposition dans l'espace graphique d'un ensemble de marques qui représentent ces moments, et donc à l'idée de dispositif graphique, si l'on entend par dispositif la détermination d'un comportement temporel par l'organisation spatiale d'un ensemble d'éléments reliés les uns aux autres³⁹, dont l'unité synergique est orientée vers l'accomplissement d'une tâche déterminée, d'une action précise. Ce qui reconduit à la définition du mécanisme au sens cartésien du terme :

Un mécanisme, c'est une configuration de solides en mouvement telle que le mouvement n'abolit pas la configuration. Le mécanisme est donc un assemblage de parties déformables avec restauration périodique des mêmes rapports entre parties. L'assemblage consiste en un système de liaisons comportant des degrés de liberté déterminés ; par exemple, un balancier de

³⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Chronophotographie#/media/Fichier:The_Horse_in_Motion.jpg

³⁹ B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique, op. cit.*, p. 16.

pendule, une soupape sur came, comportent un degré de liberté ; un écrou sur axe fileté en comporte deux. La réalisation matérielle de ces degrés de liberté consiste en guides, c'est-à-dire en limitations de mouvements de solides au contact. En toute machine, le mouvement est donc fonction de l'assemblage, et le mécanisme, de la configuration⁴⁰.

La représentation d'un mécanisme au moyen d'un dispositif graphique de marques conduit ainsi à l'idée de schéma technologique. C'est par exemple le schéma technologique du cycle 4-temps à allumage commandé du moteur à combustion et explosion. Le schéma de chaque phase nous donne un moment du cycle :

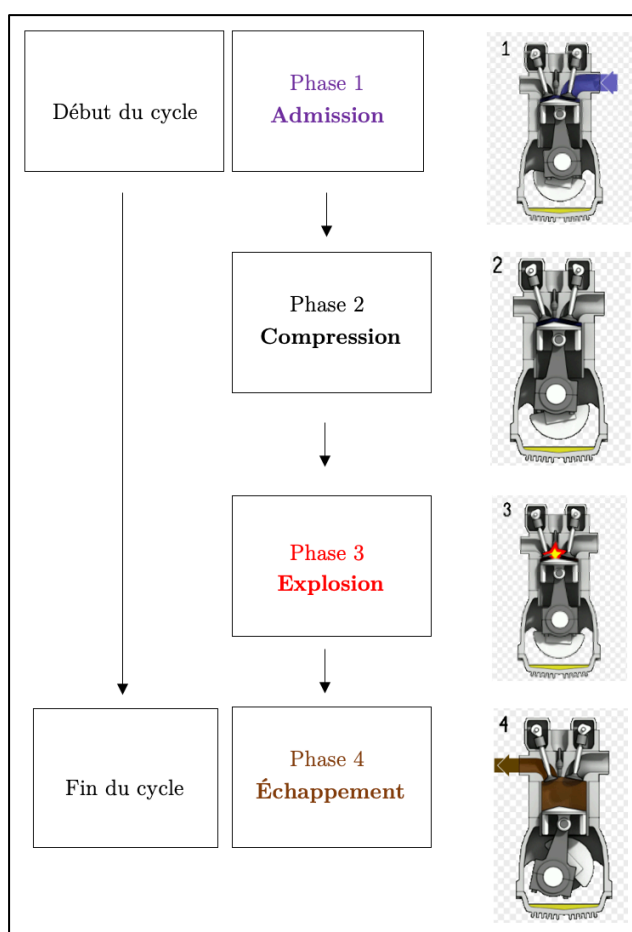


Figure 16 : Cycle 4-temps du moteur à combustion et explosion⁴¹

⁴⁰ G. Canguilhem, « Machine et organisme », *La connaissance de la vie* (1965), Paris, J. Vrin, 2009, p. 131-132.

⁴¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_combustion_et_explosion#/media/Fichier:4-Stroke-Engine.gif (Figure modifiée)

La mise en mouvement chronophotographique de ces schémas permet de simuler graphiquement le cycle. Le GIF (*Graphics Interchange Format*) du cycle permet d'en donner une représentation dynamique.

2.2 Schéma et graphe

2.2.1 Un exemple de schéma fonctionnel : le diagramme de flux

Le cycle de vie est un processus étudié pendant le développement d'un système logiciel, et plus largement informatique. Il est composé de quatre phases : la planification, l'analyse, la conception et la mise en œuvre du système sous forme de tests. Dans la phase d'analyse, deux types de diagrammes de flux sont mobilisés : le *diagramme de contexte*, qui schématise les relations d'interaction entre les acteurs extérieurs au système et le système lui-même, et les *diagrammes de flux de données*, qui schématisent les flux en circulation dans le système. La cohérence entre ces deux types de diagrammes est importante car elle doit favoriser la modélisation du processus de développement, cette dernière permettant d'identifier et d'affiner les exigences attendues du logiciel ou du système d'information envisagé. Le diagramme de flux de données (DFD) est un outil de schématisation qui comporte trois composantes principales (des flux de données, des entrées et sorties, des unités de traitement) et qui est couramment utilisé pour modéliser les systèmes opérationnels dans lesquels les fonctions du système priment les données qu'il manipule. Inspiré de la théorie des graphes, il a été utilisé pour la première fois à la fin des années 1970 par des ingénieurs dans le domaine du génie logiciel comme une notation permettant d'outiller la conception de systèmes d'informations, car il offre une représentation visuelle des flux qui y transitent. Le DFD peut être manuel ou automatisé, ou combiner manipulation et automation. Il montre où et comment l'information entre et sort du système, comment celui-ci la modifie et où il la stocke. Sa finalité est de montrer la portée et les limites d'un système dans son ensemble. Il peut servir d'outil de communication entre un ingénieur analyste et une personne ayant un rôle dans le

système, et sert de point de départ au renouvellement de ce dernier. Il commence par un *diagramme de contexte*, le niveau 0 du diagramme DFD, qui est la représentation la plus simple de l'ensemble du système :

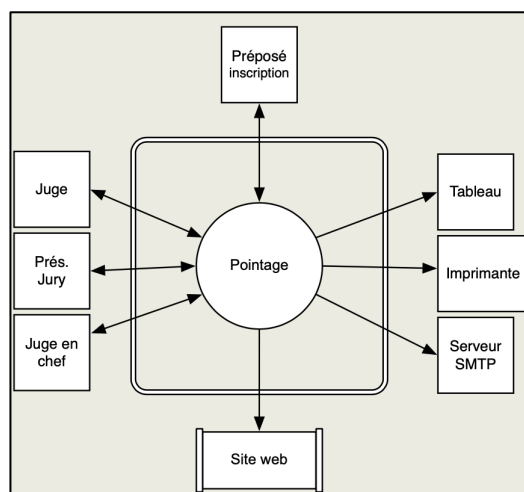


Figure 17 : Diagramme de contexte d'un système de gestion et d'exploitation de feuilles de pointage⁴²

Dès lors qu'un approfondissement de l'analyse des fonctions principales du système étudié est nécessaire, le diagramme peut continuer à évoluer pour devenir un diagramme de niveau $n + 1$. Souvent, il ne dépasse pas le niveau $n = 3$:

⁴²<http://info.usherbrooke.ca/llavoie/enseignement/Modules/TM070-DFD.pdf>

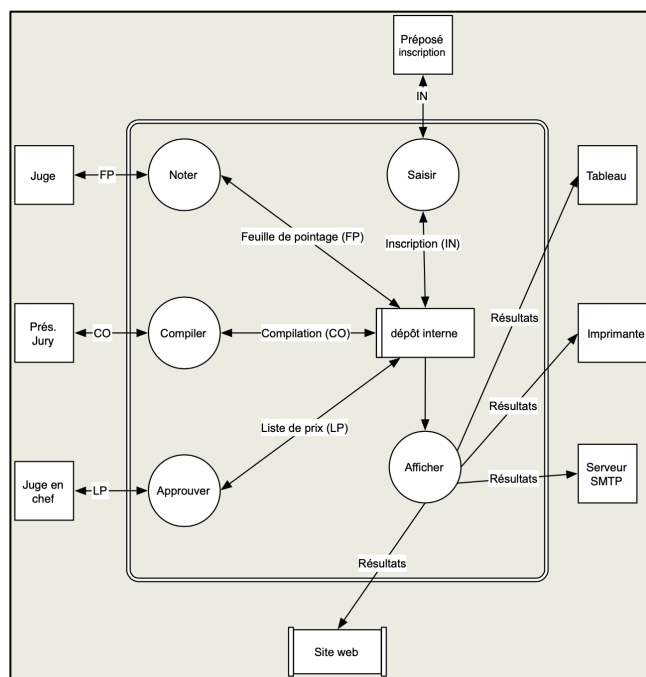


Figure 18 : DFD-1 d'un système de gestion et d'exploitation de feuilles de pointage⁴³

La systématisation des diagrammes de flux et leur codification dans un langage de modélisation unifié donnera naissance à la fin des années 1990 au langage de modélisation graphique UML (*Unified Modeling Language*). L'approfondissement et le perfectionnement d'UML conduira au développement du langage SysML (*Systems Modeling Language*) au début des années 2000, qui permet de modéliser des systèmes qui ne se limitent pas à ceux de l'ingénierie logicielle, comme par exemple les systèmes automobiles.

2.2.2 Transformation du schéma en graphe

Nous venons de voir que le schéma peut être considéré comme une abstraction de la figure spatiale et du comportement temporel. Le graphe se présente quant à lui comme un schéma au carré, c'est-à-dire comme une abstraction du schéma lui-même. Dans cette mesure, le graphe est le résultat de l'abstraction d'un schéma. C'est un schéma dont les

⁴³<http://info.usherbrooke.ca/llavoie/enseignement/Modules/TM070-DFD.pdf>

parties sont réduites à des points qu'on appelle les *sommets* du graphe et dont les relations sont matérialisées par des *arêtes* qui peuvent être orientées ou non :

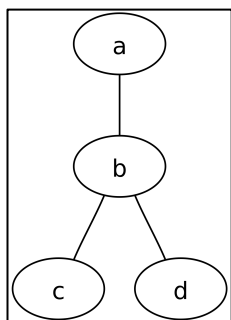


Figure 19 : Graphe non-orienté

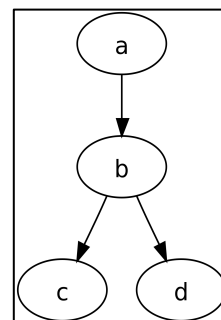


Figure 20 : Graphe orienté

Les graphes sont des modèles abstraits de réseaux reliant des objets au sens le plus général du terme. Ils ont par exemple été utilisés par Robert Rosen en biologie pour modéliser le fonctionnement d'un organisme réel et élaborer une théorie générale de la représentation du fonctionnement des systèmes biologiques⁴⁴. L'intérêt des graphes provient du fait que les relations à l'intérieur d'un être vivant sont rarement bilatérales. Comme elles sont souvent « multilatérales⁴⁵ », les graphes sont de bons outils pour tenter de représenter cette complexité :

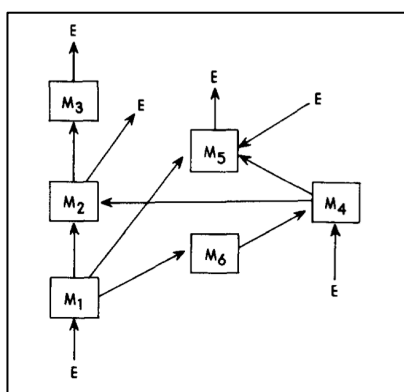


Figure 21 : Graphe des relations entre certaines composantes d'un système biologique en interaction avec un environnement qui leur est extérieur⁴⁶

⁴⁴ F. Varenne, « Théorie mathématique des catégories en biologie et notion d'équivalence naturelle chez Robert Rosen », *Philosophia Scientiae*, vol. 66, n° 1, 2013, p. 167-197.

⁴⁵ F. Varenne, *ibid.*, p. 184.

⁴⁶ Source de la Figure 21 : R. Rosen, « A Relational Theory of Biological Systems », *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 20, n° 3, 1958, p. 249.

Dans ce cas particulier, les graphes se présentent comme des schémas de relations fonctionnelles modélisant les interactions entre les différentes composantes d'un système complexe au moyen de blocs et de flèches.

2.3 Du graphe au quasi-diagramme

2.3.1 Un exemple de graphe figuratif : le diagramme stratigraphique

Produire une chronologie est l'étape primordiale de la démarche archéologique. Or l'ordonnancement stratigraphique est à la base du raisonnement chronologique en archéologie. Jusque dans la seconde moitié du 20^e siècle, la méthode stratigraphique mobilisée dans cette discipline était fortement liée aux démarches de la géologie classique. Le renouvellement méthodologique de la stratigraphie archéologique est dû à la formalisation proposée par Edward C. Harris dans les années 1970⁴⁷ grâce à un outil, le diagramme stratigraphique (*Harris matrix*), qui offre une représentation graphique et des principes de lecture de l'espace et du volume d'un site de fouille. Sa fonction est d'éliminer l'information topographique pour ne conserver que celle portant sur la succession chronologique en représentant par des arêtes les relations chronologiques entre unités stratigraphiques et en symbolisant ces unités par des blocs numérotés. Pour mieux visualiser les séquences stratigraphiques et les analyser systématiquement, on représente au moyen d'un graphe les rapports qu'entretiennent les couches entre elles. Les règles de schématisation graphique sont les suivantes : une arête verticale indique une relation temporelle d'antéro-postériorité, tandis que deux arêtes horizontales et parallèles indiquent que deux couches divisées sur le terrain sont équivalentes, c'est-à-dire correspondent à une seule et même couche coupée par une autre :

⁴⁷ B. Desachy, « Formaliser le raisonnement chronologique et son incertitude en archéologie de terrain », *Cybergeog : European Journal of Geography, Systems, Modelling, Geostatistics*, document 597, 2012.

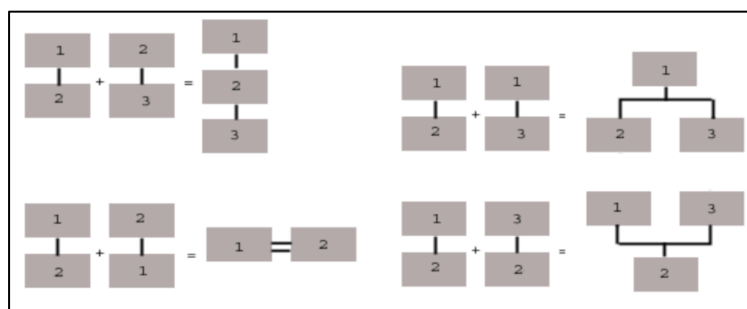


Figure 22 : Règles de schématisation des relations entre unités stratigraphiques dans un diagramme stratigraphique⁴⁸

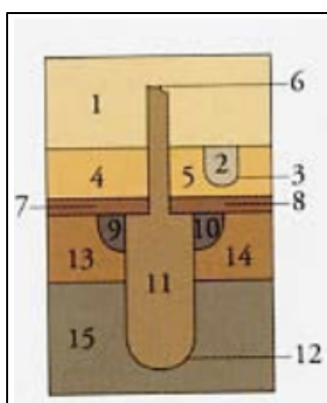


Figure 23 : Représentation stratigraphique d'un site de fouille⁴⁹

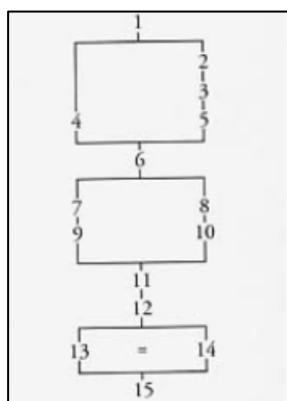


Figure 24 : Diagramme stratigraphique associé à la Figure 23⁵⁰

La formalisation mathématique de cet outil au début des années 1980 a rendu possible son informatisation, et son expression sous forme de graphes calculables. Ces

⁴⁸<https://www.studocu.com/fr/document/universite-de-nantes/methodologie-en-archeologie-1/notes-de-cours/cm7-la-stratigraphie-cours/1774317/view>

⁴⁹<https://ane.hypotheses.org/1283>

⁵⁰<https://ane.hypotheses.org/1283>

graphes d'ordonnement révèlent que le temps stratigraphique de l'ordre archéologique présente des contraintes de succession analogues à celles d'un processus de production industriel modélisé au moyen des graphes utilisés dans la Méthode des Potentiels Métra (MPM). Les graphes de type MPM, issus de la recherche opérationnelle, ont été appliqués par Bernard Roy dans les années 1960⁵¹ pour optimiser la gestion de projets de plus ou moins grandes envergures (fabrication de vilebrequins, construction du paquebot France, etc.). Dans ce type de graphe, les sommets représentent les tâches à effectuer et les arcs les étapes entre ces tâches :

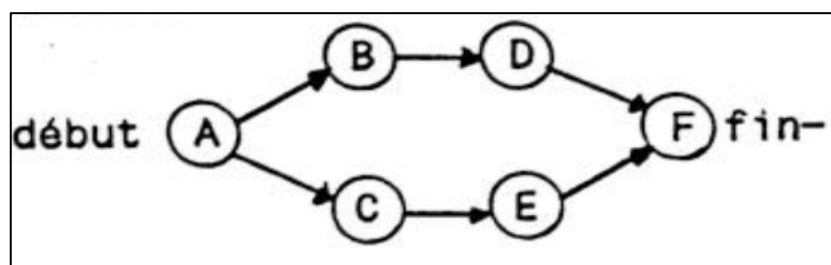


Figure 25 : Graphe de type MPM⁵²

La différence entre un graphe de type MPM et un diagramme stratigraphique est que le premier se lit de gauche à droite tandis que le second se lit de haut en bas.

⁵¹ *Bulletin de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*, Numéro spécial dédié à Bernard Roy (1934-2017), Février 2019, n° 40.

⁵² F. Djindjian & B. Desachy, « Sur l'aide au traitement des données stratigraphiques des sites archéologiques », *Histoire & Mesure*, vol. 5, n° 1, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1990, Figure 1b, p. 53.

2.3.2 Un exemple de graphe calculatoire : le diagramme d'influence

Les diagrammes d'influence (DI) rendent possible une extension du domaine d'application des réseaux bayésiens (RB) à des problèmes de décision⁵³. Or les RB sont des modèles probabilistes qui permettent grâce à leur représentation graphique de manipuler efficacement « des distributions de probabilités multidimensionnelles⁵⁴ », soit des situations où interviennent simultanément plusieurs variables aléatoires. Un RB permet de donner une représentation graphique de la loi de probabilité à plusieurs variables suivante, nommée aussi *loi jointe* :

$$P(X) = \prod_{i=1}^n P(X_i | pa(X_i)).$$

À cette composante quantitative, où pour chaque variable $X_i \in V$, on associe une classe de probabilités $P(X_i | pa(X_i))$, où $pa(X_i)$ désigne les valeurs des parents de X_i dans G , il faut adjoindre une composante qualitative qui est exprimée par le graphe orienté acyclique $G = (V, E)$, où V désigne un ensemble de nœuds qui représentent des variables aléatoires X_1, X_2, \dots, X_n et E l'ensemble des arcs entre ces nœuds, qui modélisent des relations de causalité.

Cette loi permet d'associer à un processus d'inférence l'attribution de degrés de croyance à la survenue de nouveaux événements. Des RB aux DI, la modélisation est la même, mais l'interprétation sémiotique différente : alors que les premiers sont des modèles probabilistes en tant que tels, les seconds permettent de mesurer l'importance des nœuds dans les arbres décisionnels en représentant leur poids dans le processus modélisé. La représentation topologique générale d'un diagramme d'influence est la suivante :

⁵³ N. Zemirli, *Modèle d'accès personnalisé à l'information basé sur les diagrammes d'influence intégrant un profil utilisateur évolutif*, Thèse de doctorat en informatique, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.

⁵⁴ *Ibid.*, p. 126-127.

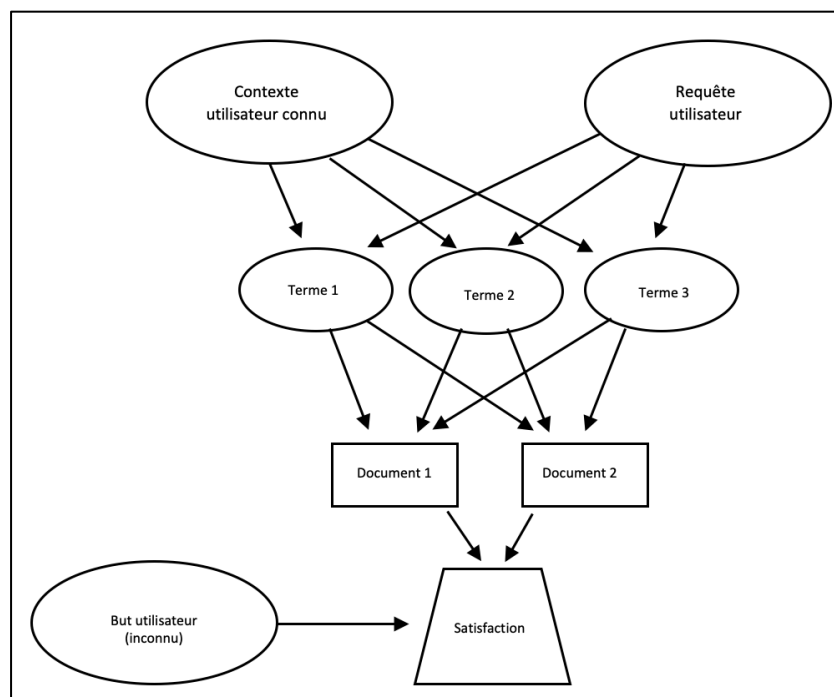


Figure 26 : Représentation générale d'un diagramme d'influence

On peut l'instancier à travers l'illustration suivante, en prenant un exemple simple où le diagramme d'influence permet de construire un modèle d'accès à l'information documentaire dans le cadre d'une situation de requête effectuée par un utilisateur⁵⁵.

En effet un utilisateur qui s'intéresse à la programmation Java est porteur d'un intérêt lié à un premier mot-clé : « Programme ». Dans l'exemple ci-dessous (Figure 27), il s'agit du contexte utilisateur connu. L'utilisateur entre une requête liée à un deuxième mot-clé : « Java ». On limite la collection de documents disponibles associés aux résultats possibles de la requête à deux documents D_1 et D_2 , pour des raisons de simplicité. Le mot-clé « Java » est polysémique, car le document D_1 comporte des informations sur l'île de Java (située en Indonésie) tandis que le document D_2 comporte des informations relatives au langage de programmation Java. Le diagramme d'influence associé à cet exemple est le suivant :

⁵⁵ L. Tamine, M. Boughanem & C. Chrisment, « Accès personnalisé à l'information : vers un modèle basé sur les diagrammes d'influence », *Revue I3 - Information Interaction Intelligence*, Toulouse, Cépaduès, 2006, p. 69-90.

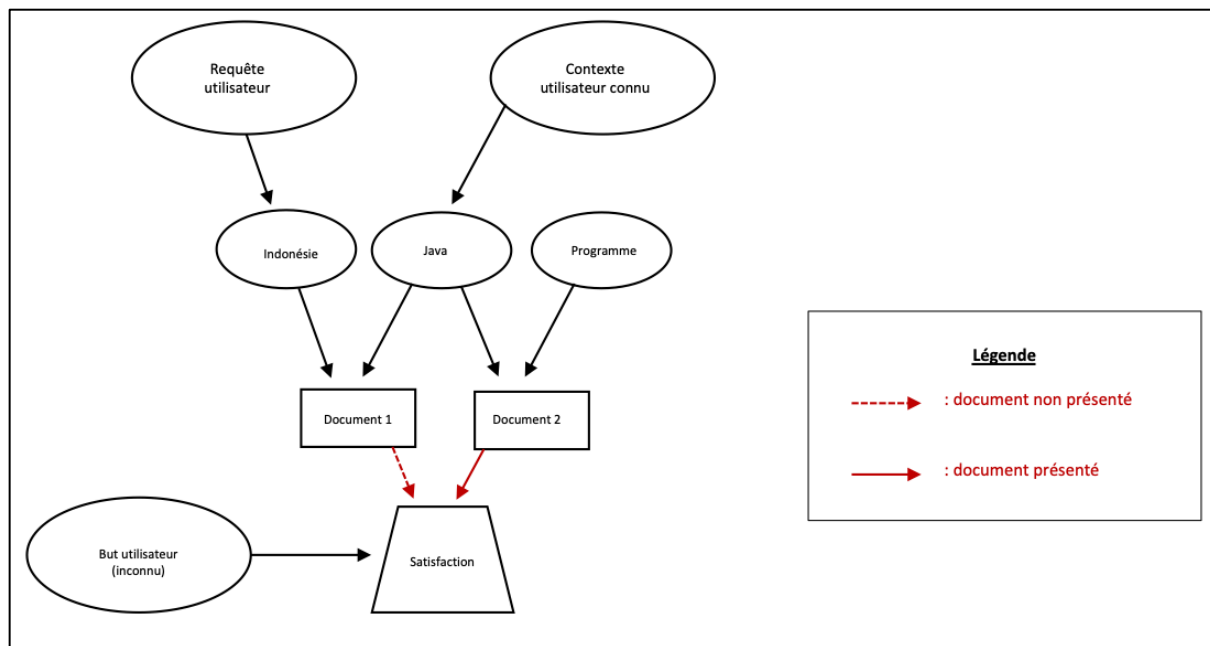


Figure 27 : Représentation particulière d'un diagramme d'influence

Un calcul de l'utilité permet de discerner l'intérêt du document D_2 relativement au document D_1 compte tenu de la requête « Java » et du centre d'intérêt « Programmation ».

Comme le modèle « évalue l'utilité de la décision de présenter ou non un document à l'utilisateur compte tenu de sa requête et de son profil décrit par ses centres d'intérêt⁵⁶ », chaque nœud de document D_i est un nœud de décision qui prend des valeurs dans le domaine $\{P, \bar{P}\}$. Ces valeurs correspondent respectivement aux décisions :

- de présenter le document D_i à l'utilisateur (P) ;
- ou de ne pas le présenter (\bar{P}).

La modélisation du processus de décision aide à choisir si l'on présente ou non les différents documents du système à l'utilisateur. L'algorithme est tel que les nœuds correspondant aux termes (symbolisés par les blocs du diagramme) ont des poids plus importants s'ils sont contenus dans la requête ou dans le contexte. Les arcs qui vont des

⁵⁶ L. Tamine, M. Boughanem & C. Chrisment, « Accès personnalisé à l'information : vers un modèle basé sur les diagrammes d'influence », art. cit.

termes aux documents dépendent des documents, ce qui permet d'associer un poids différent à chacun des documents, en fonction des poids des termes. Enfin ce poids détermine si le document en question est proposé.

L'exemple permet de conclure que compte tenu de la requête « Java » et du centre d'intérêt « Programme » de l'utilisateur qui l'a formulée, le document D_2 (qui traite du langage de programmation Java) est plus pertinent que le document D_1 (qui traite de l'île de Java).

2.3.3 Représentation relationnelle dans les graphes : le diagramme commutatif

Au sens de la théorie mathématique des catégories, un *diagramme* au sens strict⁵⁷ est une application D d'un graphe orienté ayant un ensemble de sommets S et un ensemble d'arêtes A dans une catégorie C telle que :

- les éléments de $D(S)$ sont des *objets* de C ;
- les éléments de $D(A)$ sont des *flèches* de C ;
- si a est une arête de A ayant pour origine u et pour extrémité v , alors $D(a)$ est une flèche qui part de $D(u)$ pour aller vers $D(v)$.

Le graphe associé à un tel diagramme catégoriel est appelé son « schéma⁵⁸ ». La théorie mathématique des catégories construit des dynamismes évolutifs entre catégories grâce à des « foncteurs », qui permettent d'opérer des transformations réciproques entre catégories distinctes et de généraliser progressivement à des échelles croissantes d'objets formels la notion originellement intracatégorielle de « morphisme » (synonyme de « flèche »). Une catégorie est en effet une collection d'objets et de flèches qui vérifie les règles de composition suivantes :

⁵⁷ F. Jędrzejewski, *Diagrammes et catégories*, op. cit., p. 43, n. 2.

⁵⁸ A. Grothendieck, « Sur quelques points d'algèbre homologique, I », *Tohoku Mathematical Journal*, vol. 9, n° 2, Tohoku University, Mathematical Institute, 1957, p. 130.

- le produit de la composition de deux flèches consécutives existe toujours ;
- tout objet est relié à lui-même par une flèche identité ;
- la composition des flèches est associative.

Telle est la définition la plus simple de ce qu'est une catégorie. Une flèche peut quant à elle remplir deux fonctions :

- elle peut se rapporter à la relation d'un objet à lui-même ou à un autre;
- elle peut se rapporter à l'action d'un objet sur un autre.

La notion de catégorie correspond ainsi à un univers possible comprenant des entités générales nommées « objets » et des relations dynamiques appelées « flèches ». Le diagramme d'une catégorie déterminée représente une parcelle d'un univers possible et correspond à une sélection d'actions qui y ont lieu. Les flèches qui composent le schéma graphique d'un tel diagramme symbolisent donc des actions privilégiées qui opèrent dans cette catégorie.

Dans un *diagramme commutatif*, la cible atteinte ne dépend pas de la trajectoire suivie, car il existe plusieurs parcours possibles pour parvenir à un même objet : « la commutativité assure la multiplicité des parcours pour un résultat unique⁵⁹ ». Tous les trajets, d'un objet vers un autre, sont équivalents, s'ils convergent vers le même résultat à l'issue de la composition des flèches. La commutativité d'un diagramme catégoriel est donc la traduction graphique et schématique de la possibilité d'une pluralité de composition de trajets pour l'obtention d'un même résultat :

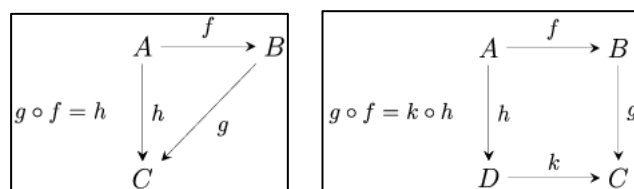


Figure 28 : Diagrammes commutatifs⁶⁰

⁵⁹ F. Jędrzejewski, *Diagrammes et catégories*, op . cit., p. 44.

⁶⁰ <https://mathworld.wolfram.com/CommutativeDiagram.html>

En ayant eu recours à la théorie des catégories pour modéliser le fonctionnement des systèmes biologiques, Rosen a cherché à montrer que ses graphes étaient l'expression de diagrammes au sens de la théorie mathématique des catégories. On remarque que la théorie des catégories dissocie graphe et diagramme : le schéma d'un diagramme est son graphe, mais un diagramme n'est pas réductible à son graphe. Qu'est-ce alors qu'un diagramme au-delà de cette théorisation particulière dans ce champ des mathématiques ?

BILAN DU CHAPITRE 2

On peut distinguer trois catégories de représentations infra-diagrammatiques : la figure, le schéma et le graphe. Une figure est une représentation synthétique et synoptique, plus ou moins dense et saturée, d'un objet, dont le schéma est la simplification et l'explicitation. Un graphe est l'abstraction d'un schéma, qui permet de modéliser des relations spatiales, temporelles et fonctionnelles entre les éléments d'un ensemble, d'un système ou d'un réseau. Alors que le schéma vise à simplifier une réalité locale pour l'appréhender, la reconnaître et ainsi mieux la maîtriser, un graphe permet de modéliser une réalité globale pourvue d'un certain degré de complexité. Ces distinctions étant posées, nous verrons dans les chapitres 5 et 6 qu'un diagramme est une représentation graphique qui peut combiner des éléments figuratifs, schématiques, réticulés et symboliques dont l'agencement est au fondement de la composition d'une machine sémiotique.

PLAN DU CHAPITRE 3

L'objectif de ce chapitre⁶¹ est de proposer une brève histoire de la pensée opératoire en identifiant les sens multiples de la notion d'*opération* afin de l'ériger en concept. À travers l'étude de quelques cas permettant d'instancier l'effectivité de l'opération dans la genèse de la pensée mathématique (géométrie euclidienne, algèbre géométrique cartésienne, théorie des nombres, théorie des ensembles, théorie de la démonstration, logique mathématique et théorie de la calculabilité), il s'agit de parvenir à saisir et à exhiber l'essence du concept d'opération, qui possède selon nous deux versants exclusifs :

- un premier versant, calculatoire, dont la représentation est algorithmique ;
- un second versant, sémiotique, dont la représentation est diagrammatique.

⁶¹ Ce chapitre reprend certains développements de l'article suivant : F. Ferri, « Technique, science, philosophie : les conditions d'exercice de l'analogie valide », *Philosophique 2017*, n° 20, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. « Annales Littéraires », n° 969, 2017, p. 79-94.

CHAPITRE 3. DE L'INFRA-DIAGRAMMATIQUE AU DIAGRAMMATIQUE

1. Note liminaire

Les situations n'ont pas de présupposés, car elles sont des impositions du réel affronté dans l'existence. La pratique est force de proposition face à la réalité problématique de l'existence, et signifie le maintien d'une persévérance, face à ce qui s'impose comme obstacle ou s'éprouve comme incompatibilité, et cela en vue d'une résolution. La complexité d'un problème, c'est le nombre des opérations à effectuer pour parvenir à sa résolution effective. Ce qui définit la complexité d'un problème pratique, c'est le nombre des opérations, avec ou sans médiations instrumentales, qu'il nécessite de mettre en œuvre par un être humain, pour être résolu. La pratique est ainsi un instinct de résolution médiatisé par une série d'opérations. La pratique est un langage muet qui précède le langage parlé, car elle est un système d'opérations silencieuses mais signifiantes, matérielles et sémiotiques. Dans la pratique, on n'a pas le temps de parler, parce qu'on sait qu'il faut agir et que le savoir pratique précède la parole, qui n'est qu'une pratique secondaire : un métalangage « pratique » de la pratique foncière. La théorie est conséquence de la pratique, car elle est édiflée grâce à la maîtrise pratique de la technique de l'écriture, qui maintient dans l'espace graphique les éléments symboliques issus de la décomposition analytique des situations schématisées. En d'autres termes, la théorie n'est qu'un schéma de simplification pratique destiné à faciliter la pratique.

La pratique est en situation. Elle est analyse d'une situation problématique en vue de sa résolution, c'est-à-dire ordonnancement d'un schématisme opératoire devant permettre le franchissement de l'obstacle ou le dépassement de l'incompatibilité. C'est pourquoi les ingénieurs sont des praticiens : ils passent leur temps à résoudre des problèmes, sans comprendre toujours comment ils les résolvent, puisque plongés dans l'urgence de la résolution. Une véritable pensée de la pratique doit alors penser l'échec, car l'échec lui est constitutif. En effet ce n'est pas l'échec qui est le négatif de la pratique, c'est le *refus de faire*, analogue pratique de la bêtise, qui est le négatif de l'intelligence. Le refus de faire, comme la bêtise, n'ont qu'une seule et même souche : le préjugé.

L'échec dans la pratique divise l'opération en acte inefficace et acte efficace. Or l'opération technique qui échoue est celle qui rate les potentiels de la nature, car elle n'épouse pas la tendance de fond : elle est un schématisme abstrait qui opère dans le vide. En revanche, l'opération concrète efficace est la congruence du schématisme de l'opérateur au travail et du dynamisme de la nature matérielle. Car la nature productrice est le support primordial, elle est la dynamique des éléments de fond. Saisir les éléments de la nature, potentialités qui ne sont pas des termes, mais des relations, c'est donc saisir les potentiels réels de la matière.

Postuler que la relation a valeur d'être, c'est postuler que les problèmes sont réels, donc que leur résolution implique une progression, un progrès dans l'être : une ontogenèse qui intègre des niveaux d'individualité croissants. Cela implique que la stabilisation d'une solution comme structure virtuelle permet sa réactualisation en situation analogue. Il en découle que la virtualité structurée est présence d'une solution qui peut être indéfiniment réactualisée : la virtualité n'est donc pas la potentialité, car la virtualité suppose la technicité, qui n'est pas support primordial (la nature), mais support secondaire (la technique). La virtualité est une solution structurée dans un support matériel organique (vivant) ou « inorganique organisé⁶² » (technique). Dès lors la connaissance peut être définie, comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, comme la virtualité d'une structure inscrite dans un support matériel. Cette virtualité peut s'actualiser grâce à une opération produisant une action efficace, qui prouve que la solution est réelle dans la mesure où elle résout le problème affronté.

La capacité à résoudre un problème est donc séparable de sa capacité d'explicitation : le savoir-faire propre à la pratique mobilise des connaissances tacites qui sont des connaissances pratiques ancrées dans le sujet opérant. Un diagramme est une représentation graphique, donc visuelle, d'un ensemble fini d'opérations par

⁶² B. Stiegler, « Leroi-Gourhan : l'inorganique organisé », *Les cahiers de médiologie*, vol. 6, n° 2, 1998, p. 187-194.

l'intermédiaire d'inscriptions matérielles. C'est une représentation pourvue d'un contenu interprétable dont le sens est celui d'un processus temporel. Un contenu interprétable est un contenu intentionnel au sens de la phénoménologie. Mais ce contenu est opératif lorsqu'il est saisi dans une dynamique pratique. Husserl est d'ailleurs le premier à avoir introduit la notion d'« intentionnalité opérative » (*fungierende Intentionalität*), qui sera explorée par Merleau-Ponty à la fin de sa vie dans les notes rassemblées sous le titre *Le visible et l'invisible*⁶³. Le diagramme, comme représentation graphique irréductible à la représentation picturale (comme par exemple une image photographique) ou schématique (comme par exemple une carte géographique), se caractérise par une intentionnalité opérative.

Une connaissance tacite pratique est donc une capacité à accomplir une action par la médiation d'un certain nombre d'opérations : l'ordonnement des opérations conduisant au résultat comme solution. La raison suffisante de la résolution peut être définie comme étant le plus petit nombre d'opérations à effectuer pour une résolution effective du problème. Elle peut alors être redéfinie comme *complexité incompressible*. L'efficacité de la méthode de résolution se manifeste quant à elle dans sa réactualisation face à des situations analogues. C'est la raison suffisante contractée dans la répétition sous forme d'habitus ayant force de propulsion et rapidité d'exécution face à l'analogie des situations. La perfection d'une méthode de résolution se manifeste :

- soit dans l'explicitation de sa mise en œuvre sous forme de connaissances discursives. L'explicitation est alors phénoménologique, et le véhicule de la connaissance, l'idiome linguistique.

⁶³ A. Dufourcq, « La plus grande trouvaille de Husserl selon Merleau-Ponty : le flux héraclitéen, entre raison et déraison », *Merleau-Ponty : une ontologie de l'imaginaire*, Springer, Dordrecht, 2012, p. 31, n. 1. Sur le concept d'intentionnalité opérative (*fungierende Intentionalität*), voir : S. Gallagher & K. Miyahara, « Neo-pragmatism and enactive intentionality », in J. Schulkin (ed.), *Action, Perception and the Brain*, Basingstoke, UK, Palgrave-Macmillan, p. 120. Nous remercions Pierre Steiner de nous avoir signalé l'existence des travaux de S. Gallagher sur ce concept.

- Soit dans la démonstration de son résultat sous forme de connaissances symboliques lui donnant valeur théorématique. L'explicitation phénoménologique se transforme alors en explication scientifique. Le véhicule de la connaissance devient l'idiome mathématique.
- Soit dans une mise en œuvre effective sous forme d'opérations constructives, qui produisent la solution. La démonstration est alors technique et pratique, *i.e.* opératoire. Le support de la connaissance devient alors le corps du ou des opérateurs.

La connaissance opératoire de la résolution d'un problème, c'est-à-dire technique, s'exprime quant à elle dans la capacité :

- à convertir une connaissance tacite pratique en connaissance explicite (être capable de dire ce que l'on fait) ;
- à traduire les opérations d'explicitation en procédures d'exécutions (être capable de faire ce que l'on dit) ;
- à montrer les procédés de résolution par la schématisation des opérations (être capable d'enseigner ce que l'on dit que l'on fait).

Alors que le discours intellectualiste transmet des mots d'ordre dans une représentation erronée de la pratique pensée comme exécution, le schéma graphique, silencieux, non porteur de mots d'ordre, suggère le geste ou la série des gestes à accomplir grâce à la figuration des lignes dynamiques qu'ils appellent, à travers leur représentation spatiale.

2. Brève histoire du concept d'opération

La première acception du terme *diagramme* qui a été donnée dans la grande *Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert est géométrique, c'est-à-dire mathématique : « figure ou construction de lignes, destinée à l'explication ou à la démonstration d'une

proposition⁶⁴ ». Cette définition est intéressante car elle nous conduit vers une acception du diagramme qui nous rapproche de notre thèse. Dire du diagramme que c'est une construction opérée en vue d'établir la vérité d'une proposition, c'est signifier que le diagramme est inséparable d'une pratique sémiotique mise au service d'un travail d'administration de la preuve. Or cette idée de signes dont l'assemblage participe à la construction d'une preuve nous met sur la voie de notre approche des diagrammes. La manipulation de signes graphiques dont la combinaison et l'enchaînement conduisent à la production d'une preuve montre que l'acception géométrique du diagramme est porteuse de la thèse que nous soutenons, à savoir qu'il s'agit d'une machine sémiotique.

2.1 Opération et pensée antique

De même que, comme l'a montré Jean-Pierre Vernant, on ne peut pas parler de « travail » en Grèce ancienne, on ne peut pas parler d'opération chez les Grecs. Opération désigne une réalité intermédiaire entre la puissance et l'acte, entre *dunamis* (δύναμις) et *energeia* (ἐνέργεια). Elle est l'équivalent de ce que Leibniz nommera dans la *Réforme de la philosophie* (1694) la « force active » (*vis activa*). On peut remarquer que le latin *opera* a pour sens premier « travail » et le latin *operatio*, le sens d'« ouvrage », c'est-à-dire de produit du travail⁶⁵. Tout l'enjeu de cette analyse étymologique est de comprendre comment l'opération est liée à un certain effort. L'opération, telle que nous l'entendons, correspond au *conatus* spinoziste, mais technicisé. Car nous montrerons, grâce à Simondon, que la « science opérative » (*scientia operativa*), dont parlait Bacon dans le *Novum organum*, est liée à la « science intuitive » (*scientia intuitiva*) dont parlait Spinoza dans l'*Éthique*, dans la mesure où l'analogie, dès lors qu'elle est comprise comme « analogie opératoire » (*i.e.* équivalence profonde qui saisit un mode de fonctionnement dans son essence irréductible) et non comme « analogie structurale » (c'est-à-dire

⁶⁴ <http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/article/v4-2401-0/>

⁶⁵ F. Gaffiot, *Dictionnaire latin français*, Paris, Hachette, 1934, p. 1081.

ressemblance superficielle), est ce qui les réunit dans un acte que Simondon a nommé « l'acte analogique ». L'acte analogique s'incarne, comme nous le montrerons plus loin, dans ce que nous appelons l' « intuition diagrammatique ».

Cet acte correspond à la vérification, opération après opération (comme on dirait « pas à pas »), d'une équivalence que Simondon a eu raison de qualifier de « transopératoire », car elle consiste en la connaissance, par le sujet, d'un schématisme qui est une série d'opérations analogiquement équivalentes à celles du fonctionnement de deux objets ou de deux situations d'interaction éloignées, dans l'espace comme dans le temps. Mathématiquement, l'équivalent formel de l'acte analogique nous est donné par l'opération d'un foncteur :

5.1- La fonctorialité est l'un des aspects premiers de la connaissance. Elle permet de relier des objets de catégories différentes, de transférer des propriétés d'une catégorie à l'autre et de déduire de nouveaux principes. Elle joue le rôle moderne de la relation aristotélicienne, mais trouve ici un autre fondement. Le propre de la fonctorialité est en premier lieu la *transduction* [souligné par l'auteur]. Issue de la théorie mathématique des catégories, elle joue un rôle moteur dans la notion d'analogie. C'est en effet le caractère fonctoriel de l'analogie qui permet le passage entre différentes catégories⁶⁶.

Un foncteur désigne en théorie des catégories la généralisation aux catégories de la notion de morphisme, cette dernière correspondant à la formalisation mathématique catégorielle de la notion d'opération. Un morphisme, c'est en effet une opération de transformation formalisée, c'est-à-dire qui n'est plus porteuse du souffle et de l'énergie qui l'animaient, tous deux réduits à des flèches dans un diagramme.

En outre, il faut distinguer l'opération de l'action ($\pi\rho\tilde{\alpha}\xi\varsigma$), et donc l'opérateur de l'acteur et de l'agent. L'opération est technique : elle renvoie au savoir-faire concret, qui n'est pas déconnecté du milieu qui lui est associé. L'opération embrasse le tour de main le plus visible et l'association d'idées la moins visible qui opère dans l'esprit de chacun. L'opération, en ce sens, est liée à la *technè* ($\tau\acute{\epsilon}\chi\nu\eta$), mais aussi à la *phusis* ($\varphi\acute{\upsilon}\varsigma\iota\varsigma$) :

⁶⁶ F. Jędrzejewski, *Ontologie des catégories*, Paris, L'Harmattan, 2011, p. 71.

suivant cette acception, elle n'est ni exclusivement liée à la *praxis* (πρᾶξις), ni exclusivement liée à la *poiesis* (ποίησις), ni exclusivement liée à la *theoria* (θεωρία). Elle désigne en effet la ligne d'intersection (*diagramma*) de ces trois plans, elle permet d'articuler la nature et l'artifice grâce à des diagrammes, car ces derniers sont les artifices graphiques qui figurent des opérations (c'est leur dimension théorique), permettent d'en constituer de nouvelles (c'est leur dimension productive), à travers une activité d'écriture qui articule l'œil et la main dans des pratiques manuelles et visuelles (c'est leur dimension pratique).

Les diagrammes induisent une manipulation graphique – opérée grâce l'œil et la main – qui n'est pas réductible à une opération de calcul, même si nous verrons au cours de cette étude que les diagrammes peuvent instrumenter notre rapport au calcul en facilitant la pratique de ces derniers. Un diagramme n'est pas entièrement réductible à un calcul, mais il peut faciliter une pratique calculatoire, comme en témoignent les usages féconds qui en sont fait en physique (diagramme de Feynman, diagramme de Penrose-Carter, etc.). L'opération est donc prise dans un processus de diagrammatisation de l'écriture elle-même au sens où cette dernière est thématisée comme un système de notations qu'il faut simplifier pour comprendre et discerner plus rapidement les opérations d'une pratique technique ou scientifique, extérieure ou immanente au symbolisme graphique. C'est pourquoi l'écriture diagrammatique est une « technologie culturelle » dont les produits forment un milieu symbolique, assurant une médiation entre les hommes et le monde⁶⁷.

⁶⁷ S. Krämer, « Writing, Notational Iconicity, Calculus: On Writing as a Cultural Technique », *MLN*, vol. 118, n° 3, 2003, p. 518-537.

2.2 Opération et pensée moderne

Si on lit l'article « Opération » de la grande *Encyclopédie* de Diderot et D'Alembert⁶⁸, on se rend compte que le sens de cette notion, au 18^e siècle, est principalement chirurgical et chimique, alors même que l'*Encyclopédie* était une entreprise de publication des opérations des métiers, c'est-à-dire des gestes techniques de l'homme au travail⁶⁹. Comme science des intentions fabricatrices, la technologie commence à s'édifier au début du 19^e siècle avec la publication en 1806 de l'essai de Johann Beckmann sur la technologie générale⁷⁰. Elle sera poursuivie en Allemagne par un début de thématization philosophique en 1877 par Ernst Kapp⁷¹, puis relayée en France à la fin du 19^e siècle par Alfred Espinas et l'école française de socio-anthropologie⁷². Avec l'avènement des mathématiques abstraites au 19^e siècle, le mot prend un sens fortement algébrique, comme en témoigne par exemple l'article rédigé par Augustus de Morgan dans la *Penny Cyclopaedia*⁷³.

⁶⁸ D. Diderot, A. Louis & G. F. Venel, article « Opération », *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, tome 11, Paris, 1^{re} édition de 1765, p. 497-501.

⁶⁹ Sur la chimie comme modèle pour un empirisme de l'opération, voir : F. Pépin, *La Philosophie expérimentale de Diderot et la chimie*, Paris, Classiques Garnier, 2012, p. 384-401 ; mais aussi : F. Pépin, « Diderot : la chimie comme modèle d'une philosophie expérimentale », *Dix-huitième siècle*, vol. 42, n° 1, 2010, §4 : « Radicalisant les traits d'une tradition baconienne d'interprétation de la nature, Diderot construit une philosophie expérimentale qui souligne et veut penser le philosophique des pratiques les plus opérationnelles. De plus, loin de chercher à les éclairer par une lumière extérieure, issue d'une philosophie du sujet ou d'une doctrine préalable, Diderot s'intéresse aux voies par lesquelles les opérations s'éclairent elles-mêmes. Tel semble le sens profond du lien entre philosophie et chimie : la constitution d'une pratique philosophique déterminant de nouveaux genres d'intérêts philosophiques. Se construit un intérêt pour les gestes et concepts chimiques, pour l'effort théorique que les chimistes manifestent en pensant leurs opérations, sans les dériver d'un système extérieur, en un mot, pour la culture que se construisent ces praticiens. Ces intérêts sont au cœur du projet général qui anime les *Pensées sur l'interprétation de la nature* et de nombreux articles de l'*Encyclopédie*, à savoir prolonger les dynamiques intellectuelles qu'une attention avertie voit dans les pratiques des gens de métiers et de savoir-faire, c'est-à-dire des expérimentateurs qui font se rencontrer art et nature dans leur travail. »

⁷⁰ J. Beckmann, « Projet de technologie générale », in G. Carnino, L. Hilaire-Pérez et J. Hoock (dir.), *La technologie générale*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2017.

⁷¹ E. Kapp, *Principes d'une philosophie de la technique* (1877), Paris, J. Vrin, 2007.

⁷² A. Espinas, *Les origines de la technologie*, Paris, Félix Alcan, 1897. Voir aussi : F. Vatin, « Mauss et la technologie », *Revue du Mauss*, n° 23, 2004, p. 418-450.

⁷³ A. de Morgan, « Operation », *The Penny Cyclopaedia of the Society for the Diffusion of Useful Knowledge*, vol. XVI, London, Charles Knight & Co., 1840, p. 442-446.

Au début du 19^e siècle, les notions d'opération, de transformation et de combinaison sont importantes en philosophie, en chimie, en botanique, ou encore en mathématiques, où elles sont à chaque fois travaillées de façons très différentes. Benoît Timmermans a montré, en mettant en regard les écrits de nombreux romantiques allemands (Goethe, Baader, Hölderlin, Novalis, etc.) avec les premières réflexions algébriques modernes de savants venus d'horizons différents (Eschenmayer, Ruffini, Rothe, Galois, etc.), comment les intuitions opératives des premiers, qui ne sont arrivées au seuil de la conscience mathématique qu'au terme d'un long parcours, ont servi concrètement les mathématiques modernes, et plus particulièrement le développement de la théorie des groupes, en mettant l'accent sur les propriétés dites « qualitatives » des opérations⁷⁴.

Tout l'enjeu d'une pensée du processus de diagrammatisation, c'est d'articuler le continu et le discret dans l'espace et dans le temps de l'écriture. Au moyen de la notion d'opération, nous ne désignons pas exclusivement un processus de diagrammatisation de l'écriture des techniques et de l'écriture de la science physico-mathématique. L'histoire de l'algèbre depuis le 16^e siècle montre qu'elle a été une lente prise de conscience, grâce à l'établissement d'une notation commode (qui n'a pas été sans peines pour les mathématiciens), d'une distinction entre les opérations et les objets auxquels ces opérations s'appliquent⁷⁵.

Les réflexions des penseurs de l'École algébrique anglaise s'inscrivent dans une lignée temporelle évolutive dont le foyer génétique remonte aux réflexions séminales de Leibniz et Bernoulli et dont l'un des passeurs méconnus est le mathématicien alsacien Louis

⁷⁴ B. Timmermans, *Histoire philosophique de l'algèbre moderne : les origines romantiques de la pensée abstraite*, Paris, Classiques Garnier, 2012.

⁷⁵ Ce processus de distinction a fait l'objet d'une thèse soutenue à Genève en 2005 par C. Ruffieux : *La naissance du concept de structure algébrique en Grande-Bretagne dans la première moitié du 19^e siècle*, op. cit. La constitution de l'écriture symbolique en algèbre a quant à elle fait l'objet de la thèse de M. Serfati : *La révolution symbolique : la constitution de l'écriture symbolique mathématique*, Paris, Pétra, 2005.

François Antoine Arbogast⁷⁶. En distinguant les opérations des objets sur lesquels elles portent, on a pu commencer à les thématiser comme des objets d'étude. La formalisation, en devenant de plus en plus abstraite, a ainsi conduit à la formation de la notion d'*opérateur*. De plus, la compréhension du « principe de la permanence des formes équivalentes », énoncé par George Peacock⁷⁷, a permis l'invention du calcul opérationnel par Oliver Heaviside dans les années 1890⁷⁸. Comme l'écrit Jean-Pierre Desclès, en parlant de l'opérateur mathématique :

celui-ci agit sur une *opérande* pour produire un *résultat*. Alors que l'opération est un concept qui vise à saisir le processus opératoire de transformation de l'opérande, l'opérateur se présente comme étant détachable de l'opérande et du processus opératoire qu'il engendre. Il peut être pensé « en soi » et pour lui-même⁷⁹.

La formule matricielle de l'opérateur est :

$$z = [x, y]$$

Dans l'application « [,] », « *x* » joue le rôle d'opérateur et « *y* » celui d'argument, « *z* » celui du résultat engendré. Dans ce cadre, l'opération prime l'objet. Cette formule permet d'ailleurs de retrouver le sens de la définition exacte de la matrice donnée dans les principes de l'algèbre universelle par Sylvester en 1884 :

⁷⁶ E. Koppelman, « The Calculus of Operations and the Rise of Abstract Algebra », *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 8, 1971, p. 155-242.

⁷⁷ M.-J. Durand-Richard, « Genèse de l'Algèbre symbolique en Angleterre : une influence possible de John Locke », art. cit.

⁷⁸ P. Humbert & S. Colombo, « Le calcul symbolique et ses applications à la physique mathématique », *Mémorial des sciences mathématiques*, n° 105, 1947, p. 1.

⁷⁹ J.-P. Desclès, « De la notion d'opération à celle d'opérateur ou à la recherche de formalismes intrinsèques », *Mathématiques et sciences humaines*, tome 76, 1981, p. 6. La distinction opération/opérateur a fait l'objet de sa thèse de doctorat d'État ès sciences : *Opérateurs-opérations : méthodes intrinsèques en informatique fondamentale, applications aux bases de données et à la linguistique*, Université Paris 7, 1981.

Le mot matrice, qui évoque surtout à l'époque les blocs creux dans lesquels on place les caractères d'imprimerie ou, en général, le lieu d'où peut naître quelque chose d'autre, a été choisi, explique-t-il [James Joseph Sylvester], pour évoquer "le schéma vide d'une opération"⁸⁰.

La matrice de la matrice algébrique est donc typographique. Elle permet de distinguer dans le principe de son fonctionnement les prémisses du λ -calcul de Church et de ce qui deviendra la sémantique opérationnelle. L'opérateur peut donc être étudié en soi, dans le cadre d'une combinatoire algébrique d'un ordre supérieur. Cela conduira, dans la première moitié du 20^e siècle, aux développements des algèbres dites d'opérateurs, initiées par John von Neumann et dominées actuellement par Alain Connes, qui jouent un rôle central en mécanique quantique⁸¹. Au 20^e siècle, l'opération s'exteriorise et se mécanise, pour prendre un sens informatique, cybernétique et ontologique⁸², à travers la Cybernétique de Wiener, la métaphysique de Simondon⁸³ et la théorie mathématique des catégories, initiée par Eilenberg et Mac Lane dans leur article séminal de 1945⁸⁴.

⁸⁰ Cité par B. Timmermans dans : *Histoire philosophique de l'algèbre moderne, op. cit.*, p. 163.

⁸¹ Le seul philosophe qui a réfléchi sur la notion d'opérateur, d'un point de vue épistémologique, étant Gaston Bachelard. Ses réflexions se trouvent dans le chapitre 4 de *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine* ainsi que dans le chapitre 8 de *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*.

⁸² M. Priestley, *A Science of Operations: Machines, Logic and the Invention of Programming*, Springer-Verlag London, 2011.

⁸³ Sur le projet simondonien d'une philosophie technologique des opérations, voir : X. Guichet, *Pour un humanisme technologique : culture, technique et société dans la philosophie de Gilbert Simondon*, Paris, Presses universitaires de France, 2010 ; X. Guichet, « Technology, Sociology, Humanism: Simondon and the Problem of the Human Sciences », *SubStance*, vol. 41, n° 3, University of Wisconsin Press, 2012, p. 76-92.

⁸⁴ S. Eilenberg & S. Mac Lane, « General Theory of Natural Equivalences », *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 58, n° 2, American Mathematical Society, 1945, p. 231-294.

2.3 Opération et pensée contemporaine

À la fin de sa vie, en 1935-1936, dans son testament philosophique⁸⁵, Husserl, qui avait commencé son œuvre en réfléchissant sur l'essence du nombre et de l'opération mathématique⁸⁶, et qui la terminera en réfléchissant sur le fondement technique de la science⁸⁷, a eu l'intuition d'un mode pratique de l'opération⁸⁸. Il appelait ce mode la « vie opérante », l'instinct à la racine de la raison. Au même moment que lui, Turing publiait son article fondateur de l'informatique, et proposait le modèle théorique d'un calculateur universel, capable de calculer toute fonction qui est récursive. Or une fonction récursive est un type d'opération : c'est une opération calculable par une machine universelle de Turing. Si toute opération récursive est calculable, on sait par ailleurs que la réciproque n'est pas vraie : toute opération calculable n'est pas récursive dans la mesure où tout calcul n'est pas réductible à un algorithme. Ce qui conduit à se poser la question suivante : qu'est-ce qu'une opération non calculable ?

Pierre Cassou-Noguès a fait sa thèse sur la notion d'expérience mathématique, telle qu'elle peut être problématisée à partir de la philosophie des mathématiques de Jean Cavailles⁸⁹. Cassou-Noguès dégage trois types d'expériences dans la philosophie des mathématiques de Cavailles auxquels sont corrélés selon lui trois types de gestes : 1° une expérience préreflexive corrélée à un « geste naturel » qui s'effectue dans l'espace sensible ; 2° une expérience sémiotique corrélée à un « geste combinatoire » qui s'effectue dans un espace de manipulation de signes ; 3° une expérience mathématique corrélée à

⁸⁵ E. Husserl, *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale*, Paris, Gallimard-Tel, 1976.

⁸⁶ E. Husserl, *Articles sur la logique*, Appendice V : « Sur le concept d'opération » (1891), Paris, Presses universitaires de France, 1995.

⁸⁷ E. Husserl, *L'Origine de la géométrie*, Paris, Presses universitaires de France, 1962.

⁸⁸ P. Ricœur, *Anthologie*, textes choisis et présentés par M. Foessel et F. Lamouche, Paris, Seuil, 2007, p. 75-76.

⁸⁹ P. Cassou-Noguès, *De l'expérience mathématique : essai sur la philosophie des sciences de Jean Cavailles*, Paris, J. Vrin, 2001, p. 14. Voir aussi : P. Cassou-Noguès, « Conscience et réflexivité dans la philosophie mathématique de Cavailles », *Methodos*, 1 | 2001.

un « geste opératoire » qui s'effectue dans une théorie mathématique⁹⁰. Le passage d'une théorie mathématique à une autre étant le point aveugle du devenir mathématique, un état dialectique obscur que Cavailles n'a pu clarifier, car fusillé par les nazis en 1944.

Selon nous, la philosophie de l'expérience mathématique de Cavailles permet de penser l'accès à la connaissance mathématique dans les termes de la théorie de la connaissance de Simondon, c'est-à-dire comme un type d'individuation. Car cette individuation est conditionnée par une exigence, qui est l'expression d'une nécessité inhérente à une situation (problème) qui appelle une action (résolution). L'action effectuée est ce qui transforme l'exigence éprouvée en nécessité avérée par la production d'une démonstration, qui permet – dans le cas des mathématiques – l'adjonction d'un résultat nouveau (théorème) à des résultats anciens (savoirs théoriques sédimentés et historiquement stabilisés). Cette individuation, qu'on peut qualifier de sémiotique dans la mesure où elle opère dans des signes qui constituent le substrat au fondement d'une intuition symbolique porteuse d'un contenu de connaissance, est donatrice de l'expérience mathématique en tant que telle⁹¹.

Baptiste Mèlès, dans un article publié en 2012, s'est proposé d'éclairer cette obscurité des états dialectiques de transition historique entre théories mathématiques⁹². Cet article fait selon nous la transition entre la philosophie des mathématiques de Cavailles et la théorie des catégories, car il permet de les articuler génétiquement au moyen de la dialectique hégélienne. Ce qui permet de penser l'articulation du discret et du continu dans la pratique mathématique telle que cette pratique est prise dans un devenir, c'est l'historicisation du concept d'opération à travers sa matérialisation graphique telle qu'elle peut être couplée à une stratégie transcendantale, parce que d'une part l'histoire du

⁹⁰ La tripartition « geste naturel », « geste combinatoire » et « geste opératoire » est de P. Cassou-Noguès. Elle est énoncée dans : P. Cassou-Noguès, *De l'expérience mathématique*, *op. cit.*, p. 13.

⁹¹ F. Ferri, « Recension de : H. Sinaceur, *Cavaillès*, Paris, Les Belles Lettres, 2013 », Notice n° 3027 du *Système d'information en philosophie des sciences*. <https://sips.univ-fcomte.fr/>

⁹² B. Mèlès, « Pratique mathématique et lectures de Hegel, de Jean Cavailles à William Lawvere », *Philosophia Scientiae*, 16-1 | 2012.

concept mathématique d'opération nous permet de comprendre en quoi le calcul des opérations est lié à la maîtrise du continu discrétisé⁹³ ; d'autre part parce que le motif transcendantal nous permet de garder une exigence de construction dans l'intuition de l'objet.

En effet si la métamathématique, c'est-à-dire la théorie de la démonstration, est un dispositif transcendantal, il faut pouvoir montrer en quoi ce dispositif conditionne l'intuition mathématique, c'est-à-dire l'expérience mathématique. Autrement dit, il faut montrer comment il conditionne les objets que l'on peut rencontrer dans l'expérience mathématique. Or l'ambiguïté des métamathématiques, c'est qu'on ne sait jamais si on a affaire à des dispositifs d'écriture, conditionnant ce que l'on peut écrire, ou à des dispositifs transcendantsaux conditionnant l'expérience. Hilbert a proposé le premier pour contrôler le second, mais pas pour le constituer (phénoménologie transcendantale) ni le conditionner (idéalisme transcendantal).

L'écriture diagrammatique préserve selon nous l'homologie entre ce qui est écrit et ce qui est visé en raison de sa propriété d'iconicité, car l'iconicité est un critère. Dans ce cadre, l'alphabet, le dictionnaire et la grammaire diagrammatiques forment un système d'écriture qui joue le rôle de métamathématique entendue comme dispositif transcendantal. Cette diagrammatisation opère la sémiotisation du transcendantal. Le premier qui a eu l'intuition de cette possibilité, c'est Peirce⁹⁴.

Dès lors, l'histoire du concept d'opération nous conduit à devoir distinguer deux perspectives : une première, de philosophie des techniques et des pratiques, dans laquelle l'opération renvoie à une essence de la technicité qui peut être saisie : 1° dans un acte efficace accompli par l'homme dans le cadre de la civilisation artisanale ; 2° dans la sériation de moments ordonnés dans le cadre d'activités routinières au sein de

⁹³ C'est la longue histoire qui mène au modèle de Turing, objet de la thèse de J. Lassègue : *L'intelligence artificielle et la question du continu : remarques sur le modèle de Turing*, Thèse de doctorat en philosophie, Paris, Université de Nanterre – Paris X, 1994.

⁹⁴ C. Chauviré, *L'œil mathématique*, Paris, Kimé, 2008.

la vie ordinaire ; 3° dans la planification d'actions complexes à l'échelle de groupes ou de populations ; 4° comme fonctionnement répétable d'un mécanisme plus ou moins complexe permettant aux objets ou aux ensembles techniques industriels d'accomplir des fonctions qui ne sont plus à la charge de l'homme. Cela s'étend de la simple opération de manutention à la plus redoutable complexité affrontée au moyen de l'hyperpuissance des processeurs actuels du calcul haute performance tels que les CPU multi-cœurs, les GPU ou autres TPU⁹⁵. Dans cette première perspective, l'opération renvoie à toute action de transformation qui a lieu dans le monde indépendamment de la représentation que nous nous en faisons dans des pratiques théoriques ou de théorisation. Dans la seconde perspective, de philosophie des pratiques de connaissance, l'opération renvoie alors : 1° à un objet d'étude médiatisé par des formats de représentation graphique ; 2° à un ensemble de performances cognitives effectuées par des agents, qui manipulent des objets symboliques formatés techniquement dans des pratiques intellectuelles de production d'intelligibilité et d'extension des connaissances. Dans cette perspective, l'opération renvoie à la mise en œuvre de l'inférence dans les systèmes symboliques technicisés : elle ne porte plus directement sur la mise en œuvre de pratiques qui transforment le monde, mais sur des objets théoriques qui transforment notre représentation du monde.

Notre travail vise à articuler ces deux perspectives simultanément, étant donné que nous postulons que le milieu symbolique est celui où le monde et la représentation ne font qu'un, et où les opérations effectuées dans le milieu induisent à la fois une transformation locale du monde et une transformation de la représentation que nous nous en faisons si la transformation est effective.

⁹⁵ CPU (*Central Processing Unit*) ; GPU (*Graphics Processing Unit*) ; TPU (*Tensor Processing Unit*).

3. Des opérations géométriques aux opérations algébriques

3.1 Un premier exemple : l'algèbre comme opérateur de traduction entre arithmétique et géométrie

Si on associe l'unité arithmétique (« 1 ») à l'unité géométrique (le segment de droite) et qu'on définit l'unité géométrique par pure convention comme étant *un segment de droite arbitraire*, c'est-à-dire une droite bornée par deux points extrémaux, alors on obtient l'unité élémentaire de mesure d'une grandeur géométrique et on peut poser une équivalence entre le symbole de l'unité arithmétique élémentaire et le segment défini comme une droite bornée par ses points extrémaux. Cette convention de départ permet de commencer à opérer un calcul géométrique, c'est-à-dire à introduire l'algèbre comme une médiation entre l'ordre arithmétique et l'ordre géométrique. Le *carré unité* peut alors être défini comme la figure géométrique composée de quatre segments qui possèdent deux à deux les mêmes points extrémaux. C'est la figure géométrique à quatre côtés égaux deux à deux de dimension 1 :

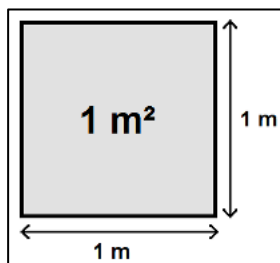


Figure 29 : Un carré d'un mètre de côté, soit un mètre carré⁹⁶

On appelle *diagonale* du carré unité le nouveau segment de droite qui relie deux points extrémaux qui n'appartiennent pas simultanément aux mêmes segments de droites, mais qui divise le carré unité en deux figures géométriques contigües identiques, toutes deux à trois côtés, car elles possèdent des côtés en nombre égaux et de mesures

⁹⁶https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A8tre_carr%C3%A9#/media/Fichier:M%C3%A8tre_carr%C3%A9.png

équivalentes : à savoir deux segments du carré unité et sa diagonale (un carré unité est une paire de triangles isocèles contigus).

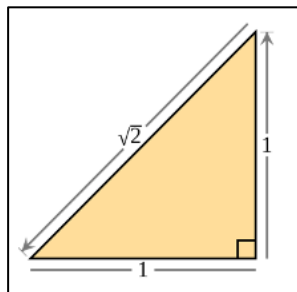


Figure 30⁹⁷ : L'hypoténuse d'un triangle isocèle de côté 1 vaut $\sqrt{2}$

Si maintenant on appelle *aire du carré unité* la surface contenue à l'intérieure des limites formées par la figure géométrique bornée par quatre segments égaux les uns aux autres, la mesure de la surface du carré unité est 1 car $1 \times 1 = 1$. Comment alors mesurer la longueur de la diagonale du carré unité ?

La surface du second carré, celui de dimension 2, dont la diagonale du carré unité constitue le segment élémentaire, est donc deux fois plus grande que la surface du carré unité. En raison du théorème de Pythagore, comme le carré de l'hypoténuse d'un triangle rectangle est égal à la somme des carrés de ses deux autres côtés, la longueur de la diagonale du carré unité est donc égale à la racine de deux fois l'unité de longueur du côté du carré unité, c'est-à-dire à $\sqrt{2}$. Par conséquent, la construction géométrique du carré de dimension 2 permet, grâce au théorème de Pythagore, de déduire la longueur de la diagonale du carré unité, et cette longueur est $\sqrt{2}$, car $(\sqrt{2})^2 = 2$.

⁹⁷https://fr.wikipedia.org/wiki/Racine_carr%C3%A9e_de_deux#/media/Fichier:Square_root_of_2_triangle.svg

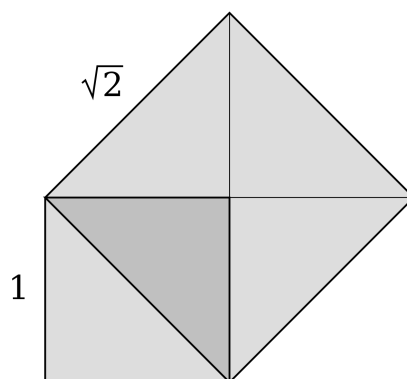


Figure 31 : Construction d'un carré d'aire 2^{98}

Cette simple construction révèle l'intimité des liens qui unissent l'arithmétique, la géométrie et l'algèbre. En effet cet exemple montre que le codage arithmétique de la géométrie élémentaire permet d'initier la construction d'un calcul géométrique dont le développement nécessite d'avoir recours à l'algèbre pour calculer une quantité géométrique qu'on ne peut pas déterminer au début de la construction dans la mesure où elle fait intervenir une classe d'objets arithmétiques qu'on ignore, à savoir les *nombres irrationnels*. Par des relations d'équivalences posées suivant des conventions interprétatives, on est conduit à découvrir le premier nombre irrationnel, $\sqrt{2}$, en partant du plus élémentaire des nombres rationnels, à savoir 1, qu'on utilise pour coder l'unité géométrique élémentaire, le segment de droite. Cette convention de départ permet de calculer des surfaces géométriques grâce auxquelles on va parvenir, au moyen des opérations de l'arithmétique élémentaire (multiplication, division, extraction de racine) et au codage algébrique d'un théorème de géométrie (le théorème de Pythagore) à calculer de nouvelles longueurs géométriques, dont la mesure va révéler l'existence d'une nouvelle classe d'objets arithmétiques : les nombres irrationnels. Ainsi l'algèbre, opérateur de traduction entre l'arithmétique et la géométrie, permet grâce au calcul géométrique, au terme d'un développement dont le foyer génétique est le carré unité, de découvrir une

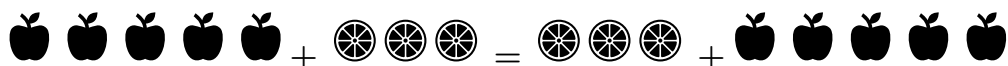
⁹⁸https://fr.wikipedia.org/wiki/Racine_carr%C3%A9e_de_deux#/media/Fichier:DoublingTheSquareV1.svg

nouvelle classe de nombres, et donc de replonger dans l'arithmétique pour en approfondir la connaissance.

3.2 Rendre visibles les opérations

François Viète constitue l'algèbre moderne en science autonome⁹⁹ en opérant la distinction entre calcul numérique (*logistica numerosa*) et calcul portant sur des lettres (*logistica speciosa*). Dès lors l'algèbre correspond à une généralisation de l'arithmétique : elle fait abstraction des nombres en tant qu'ils peuvent désigner des quantités dénombrables (cinq pommes par exemple) pour ne conserver que les règles d'enchaînement des opérations susceptibles de les transformer. « Cinq pommes plus trois oranges » est égal à « trois oranges plus cinq pommes » en raison de la loi de commutativité de l'addition :

$$5+3 = 3+5$$



Or une suite finie et réglée d'opérations menant à un résultat accessible en un temps fini est ce qu'on appelle un algorithme opératoire effectif. C'est un schéma de calcul opérant sur des quantités dénombrables dans le cas de l'arithmétique élémentaire. Mais en tant qu'arithmétique générale, l'algèbre est inadéquate pour opérer la résolution de problèmes géométriques. La stratégie initiée par Descartes dans les *Règles pour la direction de l'esprit*, puis systématisée et formalisée dans *La Géométrie*, consiste à abstraire les algorithmes opératoires issus de l'arithmétique générale pour les employer dans le but d'opérer des calculs ne portant plus sur des *nombres* ou des *grandeurs*, mais sur des *longueurs de lignes*. Les lettres (a, b, c, \dots), chiffres (1, 2, 3, 4, ...), symboles de variables et d'opérations ($x, +, /, -, \text{etc.}$) du langage formulaire de l'algèbre permettent

⁹⁹ P. Boutroux, « L'objet et la méthode de l'analyse mathématique », *Revue de métaphysique et de morale*, vol. 21, n° 3, mai 1913, p. 309.

ainsi d'opérer des calculs sur des objets dont on néglige la nature. C'est pourquoi celle-ci permet de calculer sur des nombres (aspect arithmétique), des grandeurs (aspect métrique ou analytique) ou des formes (aspect géométrique), les trois grands aspects par lesquels se montrent les objets mathématiques, comme le rappelait A. Grothendieck¹⁰⁰.

Première conséquence : on obtient une économie de mots dans l'énoncé des problèmes. C'est cela que Leibniz nomme « abréviation » dans l'un des projets de préface à la science générale¹⁰¹ : « Les fondements du calcul rationnel ». Seconde conséquence : on conserve les opérations de l'arithmétique et leurs règles d'enchaînement (algorithmes) et on substitue aux entiers naturels des « segments gradués » qui deviennent les objets d'une nouvelle discipline : la géométrie algébrique naissante mais qui ne s'appelle pas ainsi à l'époque¹⁰². Troisième conséquence : les formules algébriques qui encodent les objets, les données du problème et les procédures opératoires qui permettent de les transformer ne nous donnent plus à voir de manière transparente un contenu intuitif externe (puisque la forme n'adhère plus au contenu comme dans le cadre du raisonnement intuitif), mais des caractères graphiques faisant office de coefficients (a , b , c , etc.), de variables (x par exemple), d'opérations ($+$, $-$, $/$, $\sqrt{\quad}$, etc.) auxquels on peut affecter des valeurs numériques ($\frac{1}{2}$, 2 , etc.).

Ce qu'on voit dès lors, c'est une équation équilibrée ne laissant transparaître aucun contenu intuitif adhérent à la forme des symboles, comme dans le cas de la géométrie élémentaire, c'est-à-dire de l'intuitionnisme géométrique. La transparence n'est plus celle des objets figurés (des pommes ou des oranges), mais celle des opérations qui les transforment. Le symbole algébrique révèle qu'il montre son opération, comme dans le cas de la commutativité par exemple. L'objet, qui n'est dès lors plus montré dans son

¹⁰⁰ A. Grothendieck, *Récoltes et semailles : réflexions et témoignages sur un passé de mathématicien*, §2.9.

¹⁰¹ G. W. Leibniz, *Recherches générales sur l'analyse des notions et des vérités : 24 thèses métaphysiques et autres textes logiques et métaphysiques*, éd. J.-B. Rauzy, Paris, Presses universitaires de France, 1998, p. 166-168.

¹⁰² D. Rabouin, « *Mathesis universalis* et algèbre générale dans les *Regulae ad directionem ingenii* de Descartes », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 69, n° 2, 2016, p. 259-309.

intuition puisqu'il est symbolisé par le signe d'une variable indéterminée, est rendu invisible, tandis que l'opération, symbolisée graphiquement, devient visible. Dès lors, l'œil reste toujours le destinataire de la structure algébrique, et celle-ci est rendue visible à travers la notation.

3.3 Deuxième exemple : le codage algébrique d'un problème d'*Éléments*, II, 11

On peut prendre comme exemple l'abréviation algébrique d'un problème géométrique posé par Euclide dans le livre II de ses *Éléments*¹⁰³, dont l'énoncé en langage naturel est formulé de la façon suivante :

Soit AB la droite donnée : il faut partager la droite AB de manière que le rectangle compris sous la droite entière et l'un de ses segments, soit égal au carré de l'autre segment.

L'énoncé se réfère à la situation géométrique suivante :

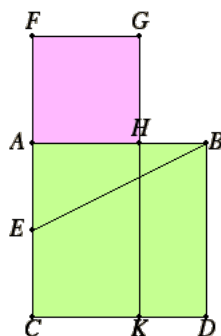


Figure 32 : Configuration géométrique du problème d'*Éléments*, II, 11

L'expression algébrique des données du problème est la suivante :

¹⁰³ L'analyse de cet exemple, que nous reformulons dans nos propres termes, se trouve dans : F. Aït-Touati & S. Gaukroger, *Le monde en images : voir, représenter, savoir, de Descartes à Leibniz*, Paris, Classiques Garnier, 2015, p. 47-48. Le problème est énoncé par Euclide dans *Éléments*, II, 11.

$$\mathbf{AB} = \mathbf{a} \text{ et } \mathbf{AH} = \mathbf{x}.$$

L'énoncé du problème se traduit donc algébriquement par la formule suivante :

$$\mathbf{x}^2 = (\mathbf{a} - \mathbf{x}) \mathbf{a}.$$

Les conditions du problème sont donc transposées sous la forme d'une équation qu'on peut résoudre :

$$\mathbf{x}^2 = (\mathbf{a} - \mathbf{x}) \mathbf{a}.$$

$$\mathbf{x}^2 = \mathbf{a}^2 - \mathbf{ax}.$$

$$\mathbf{x}^2 + \mathbf{ax} = \mathbf{a}^2.$$

$$\mathbf{x}^2 + \mathbf{ax} + \frac{1}{4} \mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^2 + \frac{1}{4} \mathbf{a}^2.$$

$$\left(\mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{a}\right)^2 = \mathbf{a}^2 + \frac{1}{4} \mathbf{a}^2.$$

$$\mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{a} = \sqrt{\frac{5}{4} \mathbf{a}^2}.$$

$$\mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{a} = \frac{\mathbf{a}\sqrt{5}}{2}.$$

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{a}\sqrt{5}}{2} - \frac{1}{2} \mathbf{a}.$$

D'où :

$$2\mathbf{x} = \mathbf{a}\sqrt{5} - \mathbf{a}.$$

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{a}\sqrt{5} - \mathbf{a}}{2}.$$

On peut encore simplifier l'expression :

$$x = \frac{a(\sqrt{5} - 1)}{2}.$$

Le processus de résolution conduit à la conclusion suivante : l'équation algébrique est bien le cryptage d'un ensemble de rapports géométriques codé par des variables, des coefficients, des quantités et des opérations. Par conséquent, l'algèbre est *inductive* au sens où elle permet de généraliser l'arithmétique pour en dégager des algorithmes opératoires ; mais elle est aussi *transductive* au sens où elle permet de calculer des quantités inconnues ou des grandeurs indéterminées grâce à des raisonnements diagrammatiques, c'est-à-dire analogiques et formels, réglés sur des signes. La machinerie diagrammatique produit un résultat, engrammé dans une formule. Cet exemple nous permet ainsi de comprendre comment, grâce à la manipulation des signes graphiques, un raisonnement analogique valide conduit à la résolution d'un problème et à une extension de la connaissance dont le résultat doit être déchiffré par une conscience intentionnelle qui en intuite le contenu.

3.4 Troisième exemple : le calcul de la somme des cent premiers entiers naturels par Gauss

« Quelle est la somme des cents premiers entiers naturels ? » posa un jour le maître d'école à la classe dans laquelle se trouvait le petit Gauss, qui était déjà grand¹⁰⁴. Pour calculer une telle somme, Gauss, qui avait alors à peine neuf ans, a procédé de la façon suivante. En raison de la loi de commutativité de l'addition, qui autorise d'être indifférent à l'ordre des opérands dans une somme :

¹⁰⁴ B. Hayes a situé l'apparition de cette légende dans l'histoire des mathématiques dans la biographie de L. Bieberbach publiée en 1938. Voir : B. Hayes, « Gauss's Day of Reckoning », *American Scientist*, vol. 94, n° 3, 2006.

$$1 + 2 + 3 = 2 + 1 + 3 = 3 + 1 + 2, \quad (3.1)$$

on peut réarranger la série des cents premiers entiers naturels en cinquante paires de nombres, qu'on peut additionner selon un ordre arbitraire. Par conséquent, cette série de paires de nombres additionnables, lorsqu'on la réduit à une formule généralisée dans laquelle n représente le nombre d'opérandes à additionner pour n'importe quelle suite d'entiers positifs appartenant à \mathbb{N} et aussi longue qu'on voudra, correspond à l'expression suivante :

$$\frac{n^2 + n}{2}. \quad (3.2)$$

La somme $\sum_{i=1}^n$ de 1 à n si n appartient à \mathbb{N} , est donc telle que :

$$\sum_{i=1}^n i = \frac{n \times (n+1)}{2}. \quad (3.3)$$

Si $n = 100$, alors :

$$\sum_{i=1}^{100} i = \frac{100 \times (100 + 1)}{2}. \quad (3.4)$$

Soit :

$$\sum_{i=1}^{100} i = \frac{100 \times 100 + 100}{2} = \frac{10100}{2} = 5050. \quad (3.5)$$

En jouant sur l'arrangement des paires à partir de la disposition des nombres dans l'espace de la feuille de papier, on peut vérifier la formule générale pour le cas de la somme des cent premiers entiers. En effet la somme des cent premiers entiers :

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \dots + 96 + 97 + 98 + 99 + 100,$$

peut être réarrangée de la manière suivante :

$$1 + 100 + 2 + 99 + \dots + 3 + 98 + 4 + 97 + 5 + 96.$$

Or :

$$\begin{aligned}
 1 + 100 &= 101 \\
 2 + 99 &= 101 \\
 3 + 98 &= 101 \\
 4 + 97 &= 101 \\
 &\dots \\
 50 + 51 &= 101.
 \end{aligned}$$

Si on définit une paire additionnable comme étant la somme de deux entiers quelconques dans une série ayant un nombre fini d'entiers, alors dans la somme des cent premiers entiers, il y a $\frac{100}{2}$ paires additionnables, soit 50, toutes égales à 101, dans la mesure où la somme des deux entiers à l'extrémité de la série est égale à 101. En effet :

$$1 + 100 = 1 \times 1 + 100 \times 1 = 1 \times (1 + 100) = 101. \quad (3.6)$$

Par analogie avec (3.6), la factorisation de 50×101 donne :

$$50 \times (100 + 1) = (50 \times 100) + (50 \times 1) = 5000 + 50 = 5050. \quad (3.7)$$

Autrement dit :

$$50 \times (100 + 1) = \left(\frac{100}{2}\right) \times (100 + 1), \quad (3.8)$$

$$\left(\frac{100}{2} \times 100\right) + \left(\frac{100}{2} \times 1\right) = \frac{100 \times 100}{2} + \frac{100}{2}, \quad (3.9)$$

$$\frac{10000}{2} + \frac{100}{2} = \frac{10100}{2}, \quad (3.10)$$

$$\frac{10100}{2} = 5050. \quad (3.11)$$

Ce qui nous permet bien de retrouver le même résultat : 5050. Cet exemple permet de montrer que deux expressions graphiques comme (3.5) et (3.7), qui ont un *sens* graphique différent, ont la même *dénotation* : 5050. L'accès à l'objet du résultat du calcul ne nécessite l'usage d'aucune expression linguistique ou propositionnelle, c'est-à-dire logique.

Cet exemple donne un argument anti-logiciste sur le statut des mathématiques. Au lieu d'être un objet de perception comme dans l'exemple célèbre de Frege¹⁰⁵, la dénotation d'une formule graphique pourvue d'un contenu qui n'est ni linguistique, ni propositionnel, peut donc être un nombre entier correspondant au résultat d'un calcul :

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \dots + 96 + 97 + 98 + 99 + 100 = 5050. \quad (3.12)$$

Lorsque $n = 100$:

$$\sum_{i=1}^{100} i = \frac{n^2+n}{2} = 5050. \quad (3.13)$$

4. Du calcul arithmétique au calcul numérique

La radicalisation des pratiques de formalisation au début du 20e siècle a conduit, avec la construction de l'axiomatique formelle, à l'objectivation du raisonnement mathématique dans la théorie de la démonstration. L'arithmétisation du raisonnement, qui s'est achevée dans la production du théorème de limitation de Gödel et a mis en échec le programme formaliste de Hilbert, a par ailleurs ouvert la voie à la découverte des fonctions récursives et à l'idée d'algorithme. La systématisation de cette idée, à travers la construction du modèle de Turing, a quant à elle permis d'opérer la mécanisation du raisonnement dans sa dimension formelle, ce qui a conduit à la construction des premiers calculateurs universels : les ordinateurs.

Une preuve mathématique, pour devenir effective, doit pouvoir être obtenue constructivement au terme de l'exécution d'un algorithme. Mais l'algorithme ne devient preuve d'un raisonnement que dès lors qu'il est mis en récit. Le diagramme ne correspond pas à la mise en récit du calcul, mais à la virtualisation d'un faire, dont l'exécution doit

¹⁰⁵ *Vénus* est l'objet perçu ou dénotation de deux expressions linguistiques de sens différents : *étoile du soir* et *étoile du matin*. Voir : G. Frege, « Sens et dénotation », in C. Imber (éd.), *Écrits logiques et philosophiques*, Paris, Seuil, Points-Essais, 1994, p. 103.

supplémenter l'effectivité calculatoire d'une effectivité opérationnelle non computationnelle. Le diagramme suggère et commande par sa machinerie sémiotique un pas opératoire qui n'est pas réductible à un pas de calcul, même si on ne comprend pas d'emblée ce qu'on fait avec un diagramme. C'est pourquoi il faut aussi le doubler d'un récit, c'est-à-dire d'un raisonnement, pour lui donner un sens. Car le diagramme est un « outil cognitif » (Giardino) qui permet à la pensée de s'opérationnaliser en faire et d'appréhender la production de la nature matérielle, dans la mesure où il traduit dans la matérialité sémiotique la matérialité physique du support technique d'inscription et la matérialité organique de la vie opérante qui s'en saisit.

La révolution numérique est issue des travaux menés à la fin du 19^e siècle et dans la première moitié du 20^e siècle sur les fondements des mathématiques, la logique mathématique et la théorie du calcul. Trois grandes étapes peuvent être dégagées : la formalisation du raisonnement (Hilbert), l'arithmétisation du raisonnement (Gödel) et la mécanisation du raisonnement (Turing), dernière étape qui conduira à la construction du premier ordinateur après la Seconde Guerre mondiale.

4.1 De la théorie des ensembles à la crise des fondements des mathématiques

Le dernier quart du 19^e siècle a vu l'éclosion de la théorie des ensembles avec Cantor. Cette théorie consiste – dans le cadre arithmétique – à décrire les nombres comme des ensembles d'éléments. On distingue deux ensembles : celui des nombres réels (\mathbb{R}) et celui des nombres entiers (\mathbb{N}). Le premier théorème de Cantor démontre que ces deux ensembles ne peuvent pas être mis en correspondance. Or deux ensembles sont dits avoir la même puissance s'ils peuvent être mis en correspondance. Cantor distingue alors ce qu'il appelle la puissance de ces ensembles : le continu, qui est la puissance de l'ensemble des nombres réels (\mathbb{R}) ; et le dénombrable, qui est celle des entiers naturels (\mathbb{N}).

Dès lors la question qu'il se pose est la suivante : existe-t-il une puissance moyenne entre le continu et le dénombrable ? Par exemple l'ensemble \mathbb{Q} des nombres rationnels

est un sous-ensemble de \mathbb{R} . L'ensemble \mathbb{Q} est dénombrable et se coordonne terme à terme avec l'ensemble \mathbb{N} , bien qu'il soit strictement plus grand que \mathbb{N} . La conjecture de Cantor énonce qu'il n'existe pas de puissance moyenne entre le dénombrable et le continu et qu'un sous-ensemble de l'ensemble des réels (\mathbb{Z} ou \mathbb{Q} par exemples) possède soit la puissance du dénombrable, soit celle du continu.

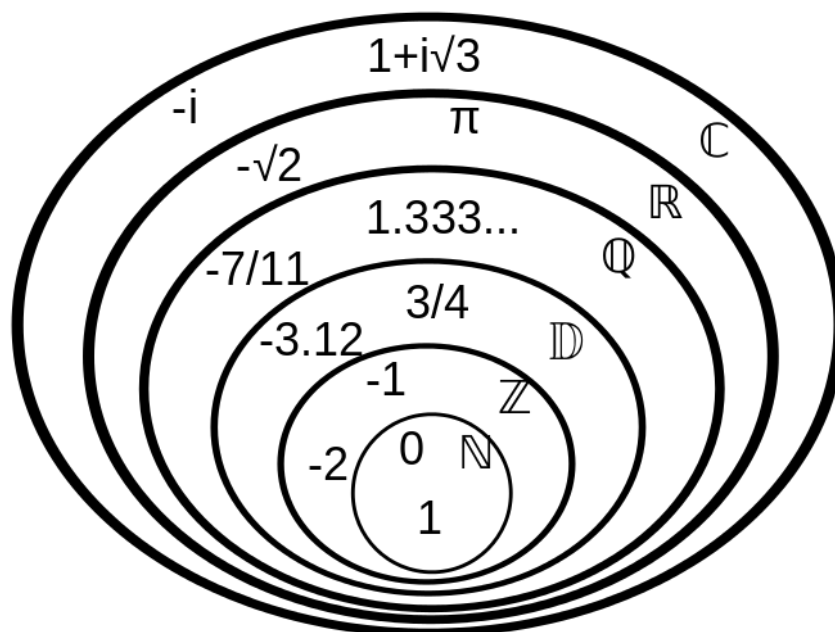


Figure 33 : Représentation diagrammatique des différents ensembles de nombres¹⁰⁶

Pour établir cette hypothèse, Cantor développe une théorie sur les nombres ordinaux, « qui prolongent dans l'infini la numération finie¹⁰⁷ ». Un nombre ordinal est l'ensemble des nombres qui le précèdent. Dans cette théorie, il distingue trois classes de nombres : celle des nombres finis (les entiers naturels qui appartiennent à \mathbb{N}) dont la suite infinie donne le premier nombre ordinal noté ω . On a donc :

$$\omega = \{0, 1, 2, 3, 4, \dots\}.$$

La seconde classe est celle de la suite des ordinaux dénombrables notée $\omega+1$. On a donc :

¹⁰⁶ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre#/media/Fichier:NumberSetinR2.svg>

¹⁰⁷ P. Cassou-Noguès, *Gödel*, Paris, Les Belles Lettres, 2004, p. 36.

$$\omega + 1 = \{0, 1, 2, 3, \dots, \omega\}.$$

Enfin, la troisième classe est celle qui définit un ordinal noté ω_1 qui est la réunion croissante de tous les ordinaux dénombrables. Donc :

$$\omega_1 = \{\omega, \omega+1, \omega+2, \omega+3, \dots, 2\omega, 3\omega, \dots, \omega.\omega, \dots, \omega^\omega\}.$$

ω_1 n'est pas dénombrable car il doit représenter la suite entière des ordinaux dénombrables et dépasser chacun d'eux. Il possède donc une puissance supérieure au dénombrable.

Cantor symbolise par des aleph (\aleph) « les puissances constituées par la suite des ordinaux¹⁰⁸ » : \aleph_0 est la puissance de ω ; \aleph_1 celle de ω_1 . Comme dans l'échelle des ordinaux \aleph_1 suit immédiatement \aleph_0 , l'hypothèse de Cantor est que le continu a la puissance \aleph_1 . Comme un nombre réel peut être représenté par une suite de nombres entiers en base 10, on peut aussi le représenter par une suite de 0 et de 1 dans une écriture en base 2. On sait par ailleurs qu'un ensemble qui possède n éléments à deux valeurs possibles (0 et 1) peut lui-même être distribué de 2^n manières. On peut donc par analogie noter 2^{\aleph_0} la puissance du continu. L'hypothèse du continu de Cantor peut donc s'exprimer sous la forme de l'égalité suivante :

$$\aleph_1 = 2^{\aleph_0}.$$

Comme la suite des entiers et comme celle des ordinaux dénombrables, on pourrait dès à présent être tenté de définir celle de tous les ordinaux par un nouvel ordinal noté ω_∞ . Cet ordinal posé, on pourrait donc former $\omega_\infty+1, \omega_\infty+2, \omega_\infty+3, \dots, 2\omega_\infty, 3\omega_\infty, \dots, \omega_\infty.\omega_\infty, \dots, \omega_\infty^{\omega_\infty}$. On aboutit à un paradoxe puisque ce nouvel ordinal, qui représente la suite des ordinaux, s'inscrit dans cette suite, et peut donc être dépassé par un nouvel ordinal, qui à son tour peut être dépassé, et cela à l'infini¹⁰⁹. Par conséquent, le

¹⁰⁸ P. Cassou-Noguès, *ibid.*, p. 37.

¹⁰⁹ *Ibid.*, p. 38.

raisonnement qui permet de dépasser le dénombrable pour raisonner sur l'infini donne lieu à une difficulté itérative et stérile. On doit la découverte de ce paradoxe au mathématicien italien Cesare Burali-Forti (1861-1931). C'est ce paradoxe, qui, suivi de ceux découverts par Bertrand Russell (1871-1970) et Jules Richard (1862-1956), va amorcer la recherche d'un fondement des mathématiques, dont l'objectif sera de les éliminer.

L'exemple de la théorie des ensembles de Cantor nous montre que le développement des théories mathématiques au 19^e siècle s'est accompagné d'une abstraction croissante de leurs objets et de leurs opérations, ce qui a conduit les mathématiciens à s'interroger sur leur statut, dans la mesure où il n'était pas possible, dans ce cas précis, de rencontrer de tels objets dans la réalité physique (comme l'infini actuel) ou d'effectuer de telles opérations dans la réalité psychologique (comme l'induction opérée sur des ensembles infinis). Bien qu'on ait pu les concevoir, il était difficile de se représenter ces objets, ou d'effectuer ces opérations. Pour cette raison, ces mathématiques ont été qualifiées d'abstraites, par opposition aux mathématiques dites concrètes, qui elles mobilisent des objets appréhendables (comme les nombres entiers) et des opérations effectuables par la pensée (comme les inférences élémentaires de l'arithmétique).

Rapporter les mathématiques abstraites aux mathématiques concrètes consiste à neutraliser le sens des notions mobilisées dans les mathématiques abstraites (comme l'infini) en représentant ces notions par des symboles vides de sens, dont la manipulation est régie par les seules relations formelles que ces symboles entretiennent entre eux, en vertu des propriétés de l'axiomatique qui les structure : l'adjonction des énoncés issus des mathématiques abstraites aux mathématiques concrètes est légitime tant que ceux-ci n'introduisent pas de contradictions dans les conclusions des systèmes formels axiomatisés permettant d'opérer des raisonnements concrets sur les entités abstraites, alors réduites à des symboles manipulables vides de sens.

4.2 Une réponse à la crise des fondements : la formalisation du raisonnement dans les systèmes formels

Le programme initié par David Hilbert (1862-1943), dit formaliste, consiste à formaliser ces théories abstraites pour tenter de les réduire aux mathématiques concrètes, en construisant des systèmes formels permettant de représenter à la fois les théories abstraites et les théories concrètes. Ainsi, en substituant un système formel à différentes théories mathématiques (abstraites et concrètes) on est conduit à pouvoir formaliser le raisonnement mathématique, et à le prendre comme objet d'étude. L'édification de systèmes formels conduit ainsi à la théorie de la démonstration, ou métamathématique.

Faire des mathématiques au sens du formalisme de Hilbert, c'est manipuler des symboles concrets et physiques en fonction de leur forme. Le programme de Hilbert peut se résumer schématiquement comme une entreprise qui vise à mathématiser l'activité du mathématicien, c'est-à-dire à considérer la manipulation de symboles (opération élémentaire de la pratique mathématique) comme un calcul (opération arithmétique élémentaire). Faire des mathématiques, c'est calculer, et calculer consiste à appliquer des règles de manipulation sur des symboles par la seule reconnaissance de leur forme. Le contenu des symboles visés n'est donc pas leur contenu intuitif (*i.e.* ce à quoi ils pourraient renvoyer par un rapport de signification, comme par exemple le mot chien, qui renvoie à l'animal quadrupède qui aboie), mais leur contenu formel, c'est-à-dire la forme du symbole en tant que contenu symbolique perçu. Le contenu de l'intuition est un contenu formel, car il porte sur le symbole comme contenu directement accessible. Dans le formalisme hilbertien, l'intuition du contenu est l'intuition d'un contenu symbolique. C'est l'intuition du symbole mathématique comme objet, qui induit par sa reconnaissance une opération cognitive, l'inférence effective du mathématicien au travail, correspondant à l'inférence prescrite par la règle de manipulation, définie *a priori* par l'axiomatique qui structure le domaine d'objets sur lequel le mathématicien travaille. C'est littéralement ce que dit Hilbert lorsqu'il écrit la chose suivante :

La condition préalable de l'application des inférences logiques et de l'effectuation d'opérations logiques est l'existence d'un donné dans la perception : à savoir l'existence de certains objets concrets extra-logiques qui en tant que sensations immédiates précèdent toute pensée. Pour que le raisonnement logique soit sûr, il faut que ces objets soient perçus dans toutes leurs parties et que leur occurrence, leur caractère distinct, leur succession ou leur juxtaposition se présentent à l'intuition en même temps que ces objets, comme quelque chose d'immédiat et qui ne se réduit pas ou n'a pas besoin d'être réduit à quoi que ce soit d'autre. [...] l'objet de notre étude sera donc les signes concrets eux-mêmes dont nous savons, du point de vue que nous avons adopté, distinguer et reconnaître la forme¹¹⁰.

Par exemple, le symbole « 3 » n'est pas manipulé parce qu'il renvoie à trois choux ou à trois carottes, mais parce qu'il s'agit d'un objet mathématique qui est par exemple soumis à l'axiomatique de Peano, qui définit des axiomes pour l'arithmétique¹¹¹. Comme l'écrit Einstein, dont le propos rejoint celui d'Hilbert :

Le progrès réalisé par l'axiomatique consiste en ceci qu'elle sépara soigneusement la partie logique et formelle du contenu objectif ou intuitif. D'après l'axiomatique, la partie logique et formelle constitue seule l'objet de la mathématique, mais non pas le contenu intuitif ou autre qu'on lui ajoute. (...) Une connaissance quelconque ou intuition de ces objets n'est pas supposée ; la seule chose qu'on suppose est la validité de ces axiomes, qui doivent être également conçus comme purement formels, c'est-à-dire dépourvus de tout

¹¹⁰ D. Hilbert, « Sur l'infini » (1926), in Jean Largeault (éd.), *Logique mathématique*, Paris, Armand Colin, 1972, p. 228.

¹¹¹ Les axiomes sont des propositions posées comme vraies, mais non démontrées, à partir desquelles une théorie peut s'édifier. Une théorie mathématique se rapporte à un domaine (par exemple l'arithmétique) constitué d'objets (par exemple les nombres entiers) ayant certaines relations entre eux. Par exemple pour tous les entiers n et p , $n \leq p$ si et seulement si il existe un entier x tel que $n + x = p$. En effet $2 \leq 5$ car $2 + 3 = 5$. En outre, ces objets sont susceptibles d'être soumis à des opérations, par exemple l'addition et la multiplication des nombres entiers. Analyser ces objets et leurs relations en leur appliquant des opérations permet de révéler leurs propriétés : par exemple un nombre premier (3, 5, 7, 11, ...) est un nombre qui ne peut pas être décomposé en produit de nombres plus petits. Ces propriétés peuvent être formulées sous formes de propositions vraies. Les théorèmes sont des propositions vraies et démontrées au sein d'une théorie concernant certains objets et leurs relations. Par exemple le théorème de Fermat-Wiles est un théorème de la théorie des nombres qui démontre que si n est un entier au moins égal à 3, il n'existe pas de nombres entiers x , y et z tous trois non nuls tels que $x^n + y^n = z^n$. Les théorèmes sont des propositions vraies parce que démontrées. Elles sont démontrées parce qu'obtenues à partir des axiomes de la théorie en respectant les règles d'inférence, garantes de la validité des raisonnements.

contenu intuitif ou accessible à l'expérience (...). Ces axiomes sont des créations libres de l'esprit humain. Toutes les autres propositions géométriques sont des déductions logiques des axiomes. Ce sont les axiomes qui définissent en premier lieu les objets dont traite la géométrie. Et c'est pourquoi Schlick, dans son livre sur la Théorie de la connaissance¹, a très justement regardé les axiomes comme des *définitions implicites*¹¹².

Le programme formaliste de Hilbert peut donc être interprété comme étant une radicalisation de la formalisation rendue possible par la raison graphique, animée par les deux motifs suivants : anéantir les paradoxes précités et sauver le paradis de Cantor¹¹³. En introduisant la notion de système formel, Hilbert introduit dans un premier temps l'idée de formaliser les théories mathématiques (axiomatique formelle) et dans un second temps celle de formaliser les raisonnements mathématiques (métamathématique). En formalisant les théories et la pratique du raisonnement mathématiques, il s'agit de réduire les théories mathématiques abstraites aux théories mathématiques concrètes, et de réduire la pratique des raisonnements abstraits à la pratique des raisonnements concrets.

Les thèses sous-jacentes au programme de Hilbert peuvent donc se formuler ainsi : tout raisonnement est réductible à un calcul et toute vérité mathématique peut être obtenue au terme d'un processus calculatoire. Autrement dit, raisonner concrètement en mathématiques, c'est pour Hilbert opérer un calcul analogue à une opération arithmétique élémentaire.

4.3 L'arithmétisation du raisonnement et le théorème d'incomplétude

C'est aux limites de cette analogie que Kurt Gödel (1906-1978) va se confronter en

¹¹² A. Einstein, « La géométrie et l'expérience », Discours prononcé à l'Académie des Sciences de Berlin le 27 janvier 1921, traduit en français par M. Solovine, Paris, Gauthier-Villars, 1921, p. 3-5.

¹¹³ La célèbre formule de Hilbert étant : « Du paradis que Cantor a créé pour nous, personne ne doit pouvoir nous chasser. » Cette traduction d'André Weil de la conférence intitulée « Über das Unendliche », prononcée par Hilbert le 4 juin 1925 à l'occasion d'un congrès de mathématiciens organisé à Münster par la Société Mathématique de Westphalie en l'honneur de la mémoire du mathématicien Karl Weierstrass, a paru dans : *Acta Mathematica*, vol. 48, n° 1-2, 1926, p. 100. DOI : 10.1007/BF02629757

procédant à une arithmétisation du raisonnement mathématique¹¹⁴. En codant par des entiers les propriétés métamathématiques de formules de l'arithmétique élémentaire (exemple : « Être une formule démontrée »), c'est-à-dire dans un système capable de formaliser l'arithmétique, Gödel arrive à construire des formules arithmétiques dont le sens métamathématique affirme leur non-démontrabilité. Le théorème d'incomplétude de Gödel met donc en échec le programme de Hilbert en démontrant la limitation interne des formalismes.

Démonstration

En effet, soit :

- \mathcal{S} : un système formel codant les formules de l'arithmétique élémentaire et leurs propriétés métamathématiques.
 - I : une formule arithmétique.
 - $NPEUFD$: une propriété métamathématique de I : « Ne Pas Être Une Formule Démontrable ».
- (1) Si I est démontrable, alors I est vraie. Mais si I est vraie, alors I n'est pas démontrable, car le sens métamathématique de I est $NPEUFD$.
 - (2) Inversement, si I est réfutable, alors I est fausse. Mais si I est fausse, alors I est démontrable, car le sens métamathématique de I est $NPEUFD$.
 - (3) Puisque \mathcal{S} est supposé non contradictoire, alors I est indécidable, car si I est décidable, alors \mathcal{S} est auto-contradictoire.
 - (4) En effet si I est décidable à l'intérieur de \mathcal{S} , alors I est simultanément démontrable et réfutable, ce qui est une contradiction.
 - (5) Or comme I affirme $NPEUFD$ et qu'en effet I n'est pas démontrable, on peut donc affirmer qu'en dehors de \mathcal{S} , I est vraie.
 - (6) Donc si \mathcal{S} est non contradictoire, alors I est vraie et pourtant non démontrable.

¹¹⁴ K. Gödel, « Sur les propositions formellement indécidables des *Principia Mathematica* et des systèmes apparentés I », in J.-Y. Girard (éd.), *Le théorème de Gödel*, Paris, Seuil, 1989.

En d'autres termes, le théorème de Gödel démontre que tout système assez puissant pour formaliser l'arithmétique comporte des propositions indécidables, c'est-à-dire ni démontrables ni réfutables dans le système, mais néanmoins vraies (elles sont abstraitement vraies mais ne sont concrètement ni vraies ni fausses). La conclusion épistémologique du théorème de Gödel est donc la suivante : démontrabilité et vérité sont des propriétés distinctes, car la production de la vérité n'est pas entièrement réductible au résultat de la certitude calculatoire. Le programme de Hilbert est donc mis en échec, car le théorème démontre qu'il est impossible de réduire entièrement les mathématiques abstraites aux mathématiques concrètes. Néanmoins une certitude est acquise : il est possible d'arithmétiser une partie des raisonnements mathématiques, et la classe des raisonnements mathématiques arithmétisables est mécanisable, car il existe des machines permettant de compter : Pascaline, machine à calculer de Leibniz, machines à différence et analytique de Babbage¹¹⁵, etc.

Autrement dit, comme une partie des raisonnements peut être réduite à une classe de calculs aveugles (*i.e.* qui ne fait intervenir aucune intuition ni aucune intelligence humaines), alors il est possible de construire une machine qui pourrait prendre en charge de tels raisonnements. C'est en effet ce que va réaliser la machine de Turing.

4.4. La mécanisation du raisonnement : la machine de Turing

En élaborant le concept d'une machine effectuant des calculs sur des symboles ayant un contenu purement formel (au sens du formalisme hilbertien tel que nous venons de l'explicitier), Alan Turing (1912-1954) a introduit la notion de calcul automatique¹¹⁶. Cette machine (qui est d'abord une vue l'esprit car il s'agit d'un modèle mathématique visant à formaliser la notion de fonction calculable en capturant son essence) est

¹¹⁵ Sur l'histoire des machines à calculer, voir la synthèse de Herman H. Goldstine : *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton, Princeton University Press, 1980.

¹¹⁶ A. M. Turing, « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s2-42, n° 1, 1937, p. 230-265.

composée : 1° d'une bande mémoire divisée en cases sur lesquelles sont inscrites en entrées des données codées dans un alphabet fini et dénombrable ; 2° d'un programme enregistré sur cette même bande mémoire, mais sur un emplacement distinct de celui des données, contenant les instructions opératoires que la machine doit effectuer sur le code des données ; 3° d'une tête de lecture/écriture à états internes (en nombre fini et mutuellement exclusifs) appliquant les instructions du programme sur le code des données. Cette tête est capable soit d'écrire un symbole, soit d'effacer un symbole, soit de se déplacer d'une case sur la bande, à droite ou à gauche. Par exemple, le comportement de la tête de lecture, à partir de son état courant qi est déterminé par un quintuplet (S_i, q_i, S_2, D, q_j) , le programme de la machine, prescrivant d'écrire le symbole S_2 à la place de S_i sur la case courante, de se déplacer d'une case vers la gauche ou vers la droite (D) et de se mettre dans l'état interne qj . Lorsque la tête de lecture rencontre un couple (qj, p) qui n'est pas enregistré dans sa table de transitions, la machine s'arrête et l'ordonnancement des symboles stockés sur la bande mémoire est considéré comme le résultat du traitement calculatoire effectué par la machine.

5. De l'algorithme au diagramme

À partir du moment où l'on prend conscience que l'informatique est une physique des signes, on peut lui appliquer la démarche transcendantale, parce que la logique mathématique modélise ce que l'informatique expérimente : l'effectivité computationnelle. B. Bachimont a montré que l'équivalent de la figure spatiale dans le cas de l'intuition pure temporelle correspond à ce qu'on appelle un algorithme¹¹⁷. Un algorithme est une suite d'opérations ordonnées, qu'on peut confier à un ordinateur, de telle sorte qu'il donne la solution du problème dont l'algorithme est la méthode de résolution calculatoire, en un temps relativement raisonnable. L'algorithme, pilotant

¹¹⁷ B. Bachimont, *Herméneutique matérielle et Artéfacture : des machines qui pensent aux machines qui donnent à penser. Critique du formalisme en intelligence artificielle*, Thèse de doctorat en épistémologie, Palaiseau, École Polytechnique, 1996, p. 209-211.

l'exécution d'un programme enregistré sur un support dynamique – la machine de Turing – est donc une méthode de résolution qui s'exécute dans un intervalle temporel raisonnable à travers une physique des signes, qui est une mécanique sans substrat, parce qu'elle fait abstraction de la dynamique de la matière.

Qu'est-ce qu'un calcul ? Un mécanisme abstrait, parce qu'indépendant de tout substrat matériel ou physique, mais pourtant effectif. Dès lors comment se construit l'informatique comme science ? À partir de l'infini temporel donné en acte par la notion d'intervalle temporel réalisé. Mais ce que ne capte pas l'algorithmique, c'est l'infinité non dénombrable des points intermédiaires. Or c'est dans cet infini non dénombrable que plonge la pensée diagrammatique. C'est pourquoi l'algorithmique ne capte pas la dynamique de la matière, et forme une géométrie du temps, comme l'a remarqué Bachimont¹¹⁸. Cette géométrie du temps, c'est ce que cherche à dominer en permanence la théorie informatique de la complexité calculatoire, en réduisant les longueurs géométriques temporelle à des algorithmes effectifs qui terminent, c'est-à-dire qui permettent de déléguer des traitements automatiques finis à des machines computationnelles qui nous assistent.

Dès lors, nous pouvons poser la chose suivante : si le diagramme désigne un schéma de résolution incalculable, alors le diagramme est le complément de l'algorithme. Ce n'est donc pas une figure temporelle, mais une figure spatiale, qui n'est pourtant pas réductible à une figure géométrique. Si le diagramme n'est ni une figure temporelle (puisqu'il ne faut pas le confondre avec un algorithme) ni une figure géométrique (puisqu'il ne faut pas non plus le confondre avec une forme géométrique), que figure-t-il et comment le figure-t-il ? Il figure des opérations, mais ces opérations doivent être non calculatoires, sous peine de transformer le diagramme en algorithme.

Les diagrammes, comme formes statiques porteuses de virtualité, figurent des opérations pratiques sous formes de schémas : le schéma graphique virtuel étant le

¹¹⁸ B. Bachimont, *ibid.*

symbole de l'opération¹¹⁹, et l'opération actuelle, le *paradigme* du schéma. Le diagramme comme forme symbolique statique est donc une figuration schématique non algorithmique et non géométrique, ayant un ancrage paradigmatique d'origine technique : c'est une figuration d'opérations incalculables, c'est-à-dire d'opérations techniques et pratiques. Quelle est la classe des opérations incalculables ? C'est celle des gestes. Qu'est-ce qu'un geste ? Une opération courante du corps dans son commerce pratique avec les choses du monde, qui lui tombent sous la main. En ce sens, un geste implique un mouvement : il est une opération du corps qui implique sa mise en mouvement. Si bien qu'on peut ajouter la chose suivante : le geste, c'est l'unité élémentaire, considérée abstraitement, du corps en mouvement, et plus exactement, d'une ou de plusieurs de ses parties. Suivant qu'il y a une ou plusieurs parties en mouvement, on peut distinguer le geste simple du geste coordonné ou geste pourvu d'un certain degré de complexité. Avec cette notion de parties en mouvement (toutes pourvues d'un certain degré de liberté), conduisant à la restauration périodique des mêmes rapports entre parties, on obtient la définition élémentaire du mécanisme au sens cartésien du terme, et celle de dispositif mécanique, si l'on entend par dispositif la détermination d'un comportement temporel par l'organisation spatiale d'un ensemble d'éléments reliés les uns aux autres¹²⁰, dont l'unité synergique est orientée vers l'accomplissement d'une tâche déterminée, d'une action précise.

Pourquoi un geste est-il une opération incalculable ? Parce qu'il est en partie une opération cachée, donc imprédictible. Pour être techniquement efficace, le geste doit en effet être pourvu d'un contenu intuitif qui en est le support et la tendance directrice de fond. Le dynamisme des opérations cachées de la nature est saisi dans l'opération technique complète et concrète par une intuition analogique psychosomatique : il est

¹¹⁹ G. Simondon, « Les encyclopédies et l'esprit encyclopédique », in N. Simondon et I. Saurin (éd.), *Sur la philosophie, 1950-1980*, Paris, Presses universitaires de France, 2016, p. 120.

¹²⁰ B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*, op. cit., p. 16.

senti, éprouvé, vécu. L'intuition analogique accomplit le schématisme de l'opération et ce schématisme peut être abstrait par le diagramme grâce à sa propriété d'iconicité opérationnelle, qui schématise la dynamique des points intermédiaires que l'algorithmique ne capture pas.

Une approche anthropologique et sémiotique du geste, suivant la voie initiée par André Leroi-Gourhan et Marcel Jousse¹²¹, doit alors le relier à la notion de rythme, qui elle-même peut être formalisée par celle de programme, entendue dès à présent en un sens élargi, qui dépasse la seule acception informatique du terme. La forme se formalise et s'idéalise, le rythme se programme, mais ni la figure ni le calcul ne peuvent redonner la forme et le rythme, car ils renvoient au versant non calculable de l'expérience dont le diagramme est l'expression.

L'anthropologie philosophique, c'est-à-dire la philosophie des pratiques nourrie aux sciences humaines et sociales et armée d'une compréhension culturelle des sciences exactes, peut alors, grâce à ses concepts, éclairer des phénomènes socio-historiques en arrivant à les *penser*. C'est ce dont témoigne par exemple le concept de « mégamachine » élaboré par Lewis Mumford à partir de la définition de la machine donnée par Reuleaux dans sa *Cinématique*¹²².

Le geste est donc une opération pratique, puisque ce sur quoi il opère d'abord et avant tout, ce sont les choses du monde qui nous sont les plus familières et qui nous entourent : celles de notre quotidien (prendre une fourchette pour manger, tourner un

¹²¹ A. Leroi-Gourhan, *Le Geste et la Parole*, tome 2, Paris, Albin Michel, 1965 ; M. Jousse, *L'anthropologie du geste*, Paris, Gallimard-Tel, 2008.

¹²² L. Mumford transforme le regard porté sur le fonctionnement de l'architecture despotique, comme celui qu'on peut voir à l'oeuvre dans la construction des pyramides égyptiennes, en montrant que la société qui préside à leur réalisation doit être conçue comme une « mégamachine », dans la mesure où il s'agit d'un concept dont la signification est analogiquement équivalente à la définition de la machine proposée par Reuleaux selon lequel une machine est ce qui « combine des éléments solides fonctionnant sous contrôle humain pour transmettre un mouvement et exécuter un travail » (cf. A. Sauvagnargues, « Machines, comment ça marche ? », *Chimères*, vol. 77, n° 2, p. 36, n. 1). L'originalité de Mumford consiste à discerner l'essence mécanique d'une forme d'organisation sociale pour légitimer l'extension du concept de machine au-delà de l'objet technique individuel. Voir : L. Mumford, « La première mégamachine », *Diogène*, n° 55, juillet-septembre 1966, Paris, Gallimard, p. 3-20.

robinet pour faire sa toilette, etc.). L'unité élémentaire et opérationnelle de l'analyse de la pratique, on peut donc dire que c'est le geste. Mais considérer un geste de façon isolée, c'est le considérer abstraitement. Ce qu'il faut considérer, c'est un enchaînement de gestes dans une situation d'interaction, dans une conduite qui manifeste un comportement (indépendamment de toute considération intentionnelle) : le décryptage du code de ces enchaînements étant l'un des enjeux de la robotique des systèmes mécatroniques. Dès lors, la notion d'algorithme peut-elle avoir une entente élargie comme celles de machine ou de programme ? Autrement dit, quel est le pendant anthropologique du concept informatique d'algorithme ?

Selon nous, il s'agit de la réalité à laquelle se réfère le concept de diagramme. En effet, si le diagramme désigne un schéma de résolution qui renvoie au versant non calculable de l'expérience (voir supra), alors le diagramme est le complément de l'algorithme. Ce n'est donc pas une figure temporelle, mais une figure spatiale, qui n'est pourtant pas réductible à une figure géométrique. Si le diagramme n'est ni une figure temporelle calculable (puisqu'il ne faut pas le confondre avec un algorithme) ni une figure géométrique (puisqu'il ne faut pas non plus le confondre avec une forme géométrique), que figure-t-il et comment le figure-t-il ? Il figure des opérations, mais ces opérations doivent être incalculables, sous peine de transformer le diagramme en algorithme, c'est-à-dire en série d'opérations calculables transcodées dans des formes géométriques (voir Figure 34). La manipulation d'un diagramme permet par exemple de trouver la formule de la première identité remarquable du second degré :

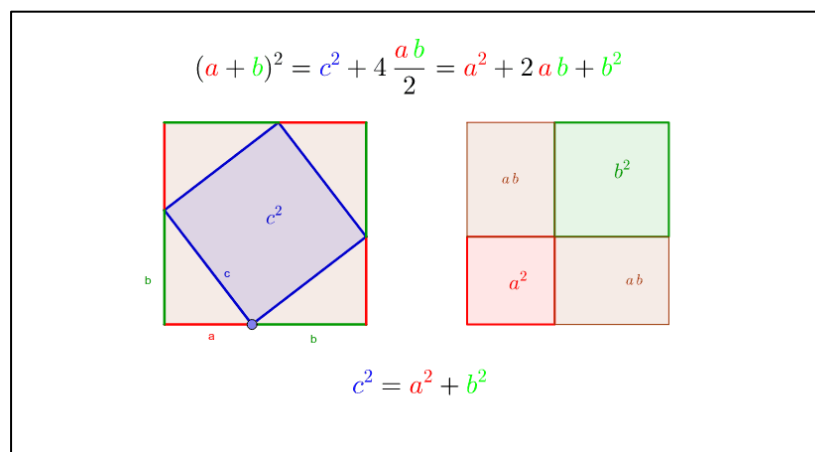


Figure 34 : Théorème de Pythagore figé après son encodage algébrique

De plus, on peut remarquer que le diagramme figure ces opérations sous forme de schémas expressifs : un schéma (par exemple un carré comme forme géométrique) peut être le symbole d'une opération (par exemple l'opération puissance), et une activité technique (par exemple arpenter), le paradigme général du schéma géométrique (l'arpentage comme origine de la géométrie). Le diagramme est donc une figuration schématique non algorithmique et non géométrique, ayant un ancrage paradigmatique d'origine technique : c'est une figuration d'opérations non calculatoires, c'est-à-dire d'opérations techniques. Quelle est la classe des opérations non calculatoires et donc incalculables ? C'est celle des gestes figurés dans les représentations qu'on appelle des « chaînes opératoires » (voir Figure 35). Dans cet exemple, le diagramme désigne la chaîne opératoire démonstrative participant au processus de construction de la preuve du théorème de Pythagore :

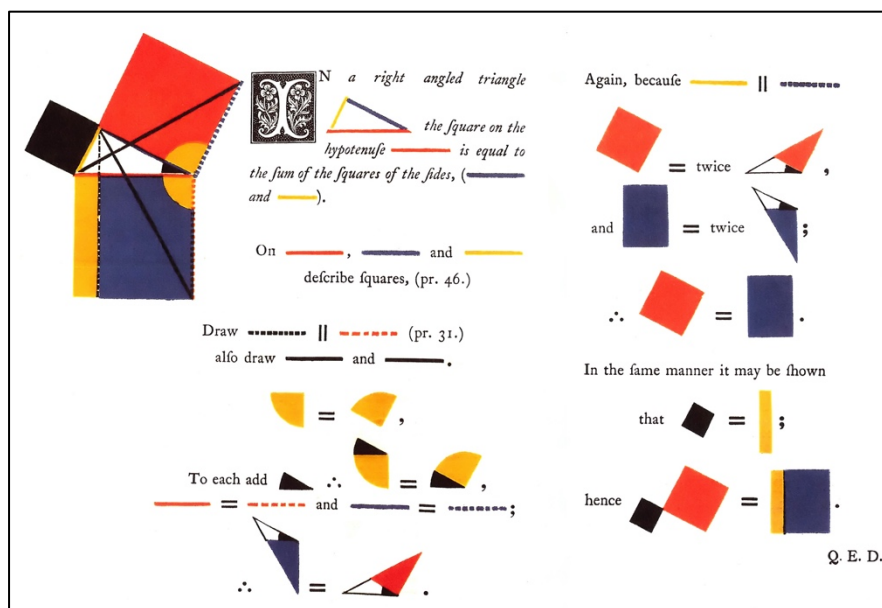


Figure 35 : Preuve du théorème de Pythagore démontré par Oliver Byrne dans son édition illustrée des *Éléments* d'Euclide (1847)¹²³

Dès lors, en quoi la traduction algorithmique de ce qui se passe dans la lecture du diagramme et la production de la chaîne opératoire n'est-elle pas suffisante ? Tout diagramme est traduisible en une chaîne algorithmique manipulatoire, mais aucune de ces chaînes ne remplace un diagramme, car l'opération diagrammatique ne se réduit pas à une succession d'étapes, comme un calcul, mais mobilise aussi ce qu'il y a entre les étapes. C'est là où l'expressivité du diagramme entre en jeu, et ne peut pas être réduite à un isomorphisme structurel : il s'agit d'une analogie de formes au sens de l'audiovisuel analogique, car les formes temporelles représentées dans les diagrammes et exécutées dans leur actualisation sont analogues. Cette actualisation analogique suscite une réinvention un sein d'une lignée technologique qui engendre un progrès technique. C'est par un tel acte analogique de réinvention que Claude Shannon, par exemple, a traduit concrètement les fonctions logiques de l'algèbre booléenne en portes logiques dans les circuits électroniques. Ces formes inscrites dans une même ligne temporelle évolutive participent ainsi d'un même schème, bien qu'elles ne se ressemblent pas.

¹²³ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Byrne_1847_Satz_des_Pythagoras_Hochformat.jpg

BILAN DU CHAPITRE 3

La reconstruction génétique de la pensée opératoire, à travers l'étude des grands moments structurants de l'histoire de la pensée mathématique et de l'évolution de la sémantique associée à la notion d'opération, permet de comprendre comment l'opération est une réalité qui s'extériorise dans des dispositifs d'écriture qui finissent par se concrétiser en dispositifs de traitement mécanique de l'information discrétisée et numérisée. Le programme formaliste de Hilbert peut être interprété comme une radicalisation de la formalisation rendue possible par l'écriture graphique, car l'écriture graphique du mathématicien manipulant des formules peut être transformée en une écriture déductive automatique effectuée par un système formel. Mais l'établissement du théorème de Gödel a mis en échec le programme de Hilbert en montrant que les vérités mathématiques ne sont pas totalement réductibles aux résultats obtenus au terme de déductions automatiques : seule une partie des raisonnements mathématiques peuvent être réductibles à des calculs, donc être délégués à des machines. En ayant construit une représentation universelle de ce qu'est un calcul, Turing nous a permis de comprendre grâce à son modèle théorique – nommé machine de Turing – qu'exécuter un algorithme au sein d'un dispositif informatique est équivalent à effectuer un calcul arithmétique avec un dispositif papier/crayon. Exécuter un algorithme, dans le cas le plus simple, c'est donc effectuer un calcul arithmétique automatisé au sein d'un ordinateur, qui est une réalisation concrète du principe de fonctionnement de la machine abstraite de Turing. En distinguant analytiquement deux facultés à l'œuvre dans le raisonnement mathématique¹²⁴ – l'intuition (*intuition*) et l'ingéniosité (*ingenuity*) – Turing a pressenti le potentiel d'amplification et d'extension de la *pensée qui connaît* au cœur du raisonnement diagrammatique, mais il n'a pas étudié leur couplage au sein de l'acte organico-sémiotique de la manipulation diagrammatique. C'est ce à quoi nous allons essayer de nous atteler dans les chapitres 4, 5 et 6.

¹²⁴ A. M. Turing, « Systems of Logic Based on Ordinals », *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s2-45, n° 1, 1939, §11, p. 214-215.

DEUXIEME PARTIE : TYPOLOGIE DES DIAGRAMMES

PLAN DU CHAPITRE 4

Le premier objectif de ce chapitre est de justifier notre démarche en présentant la méthodologie empirique qui a présidé aux classifications que nous exposons dans les chapitres 5 et 6. L'inventaire que nous avons réalisé, qui comptabilise presque soixante-dix diagrammes, nous a permis d'identifier et catégoriser :

- six catégories de composantes constitutives de ces machines graphiques que sont les diagrammes : les axes, les blocs, les descripteurs, les lignes, les symboles, les zones ;
- cinq classes de fonctions diagrammatiques : phénoménologique, fractale, modélisatrice, méthodologique et correctrice ;
- quatre classes d'objets référentiels dont les diagrammes sont selon nous les lieux-tenant : les grandeurs mesurables des sciences de la nature, les objets phénoménologiques quantifiables des sciences humaines et sociales, les objets manufacturés de l'intelligence fabricatrice, les performances réalisées de l'intelligence artistique.

Le second objectif est de présenter deux classes de pseudo-diagrammes, les représentations graphiques de données et les cartogrammes, et quelques quasi-diagrammes, à travers l'analyse des cas suivants : le diagramme en bâtons, le diagramme de Pareto, le diagramme de Hertzsprung-Russell, le diagramme Isotype, le diagramme de Hasse, le diagramme de Ferrers, le diagramme de Coxeter et le diagramme de Dynkin.

CHAPITRE 4. METHODOLOGIE EMPIRIQUE, PSEUDO-DIAGRAMMES ET QUASI-DIAGRAMMES

1. Justification de la démarche adoptée

Commençons par partir de l'étymologie. Diagramme provient du terme grec **διάγραμμα**, composé du préfixe **δια-** signifiant « à travers », et du nom **γράμμα** signifiant l'inscription tracée en tant qu'elle désigne une figure qui se détache d'un fond, à savoir son support d'inscription en tant que tel. Cette inscription standardisée, pour les Grecs, désigne la lettre de l'alphabet. C'est la raison pour laquelle **διάγραμμα** signifie dans la langue des Anciens toute figure qui est délimitée par des lignes. Ce premier sens attaché au terme est ce qui permet de comprendre sa deuxième acception : celle de « proposition géométrique¹²⁵ ». En tant que proposition géométrique, le diagramme est en effet ce qui permet au mathématicien géomètre d'articuler la figure à la lettre afin de démontrer la vérité des propositions énoncées sur les propriétés géométriques des figures qu'il étudie. Permettant de penser la pratique d'une articulation du sens de la figure au sens de la lettre grâce à l'entremise du nombre dans l'exploration des objets formels par excellence, les **μάθημα**, la provenance grecque du sens de la notion nous permet de comprendre la double fonction d'opérateur de traduction et d'opérateur de construction qu'est tout diagramme mathématique, d'une part parce qu'il se révèle être un outil graphique permettant de construire des preuves, d'autre part parce qu'il se révèle constituer l'interface qui rend possible la navigation entre les différents mondes de l'univers mathématique, ce dont a témoigné l'usage heuristique de la théorie des catégories dans le cadre du développement de la géométrie algébrique abstraite dans la seconde moitié du 20^e siècle¹²⁶.

Cette double caractérisation du diagramme est celle qui donne tout son sens à cet énoncé formulé par l'un des plus grands mathématiciens du 20^e siècle, plus de 2000 ans après l'instauration de l'axiomatique euclidienne : « Les signes et les symboles de

¹²⁵ **διάγραμμα**, **ατος**, **τό**. Source :

<http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus:text:1999.04.0057:entry=dia/gramma>

¹²⁶ R. Krömer, *Tool and Object: A History and Philosophy of Category Theory*, Basel, Birkhäuser, 2007.

l'Arithmétique sont des figures écrites et les figures géométriques sont des formules dessinées¹²⁷ ». Elle est aussi celle qui permet selon nous de redéfinir une notion héritée de Leibniz dans les termes d'une problématique actuelle, c'est-à-dire relative à l'état des sciences et des techniques en ce début du 21^e siècle. Cette notion leibnizienne est celle d'*expression*¹²⁸, qu'il nous semble fondamental de redéfinir en raison de l'interdépendance essentielle des notions de *machine* et d'*analogie*. Ces deux notions doivent être thématiques sémiotiquement, parce qu'elles sont porteuses des idées directrices d'un nouveau programme d'ingénierie : l'ingénierie sémiotique.

La notion de *machine sémiotique* permet en effet de poser à nouveaux frais la question de la possibilité d'une caractéristique, c'est-à-dire d'une langue symbolique universelle, héritée de Leibniz¹²⁹. Codifiée sémiotiquement, l'analogie permet de réhabiliter le raisonnement analogique comme une véritable méthode d'invention (*ars inveniendi*), à la fois rationnelle, opératoire et constructive, car démontrée par des constructions ingénieuses reproductibles qui témoignent d'une intelligence humaine réifiée dans des structures techniques qui fonctionnent. Ces constructions font sens car elles sont investies d'esprit, elles déchargent l'homme de certaines tâches laborieuses car elles sont externalisées dans des machines qui fonctionnent. Enfin, elles permettent d'instrumenter le rapport pratique de l'homme au monde en étendant ses moyens d'exploration et d'action, et d'outiller son esprit afin de penser son rapport théorique et pratique au monde et à la nature.

En effet, ce que nous révèle l'histoire des sciences modernes, c'est que les diagrammes sont d'abord des outils graphiques constitutifs des pratiques scientifiques et des résultats produits par les sciences, qu'elles soient expérimentales (biologie, chimie, physique, sciences cognitives), formelles (informatique, logique, mathématiques), humaines et

¹²⁷ D. Hilbert, *Sur les problèmes futurs des mathématiques*, Sceaux, J. Gabay, 1990, p. 8.

¹²⁸ V. Debuiche, « La notion d'expression et ses origines mathématiques », *Studia Leibnitiana*, vol. 41, n° 1, 2009, p. 88-117.

¹²⁹ G. W. Leibniz, *Mathesis Universalis : écrits sur la mathématique universelle*, éd. D. Rabouin, Paris, J. Vrin, 2018.

sociales (anthropologie, économie, géographie, histoire de l'art, linguistique, musicologie, psychologie, sciences de gestion, sciences de l'éducation, sociologie, etc.), sciences de l'ingénieur ou sciences des données.

Dans le domaine des arts au sens très large du terme (art numérique, architecture, danse, design, musique, peinture, urbanisme), comme c'était déjà le cas dans les sciences expérimentales naissantes, les diagrammes se révèlent être des outils graphiques de conception qui précèdent la mise à disposition des formalismes théoriques (*i.e.* les machines formelles de la logique mathématique) et des dispositifs techniques (*i.e.* les machines concrètes de la technologie).

Notre approche des diagrammes n'est pas philologique : elle ne vise pas à déterminer un corpus de textes dispersés à travers les siècles et la multitude des domaines du savoir. Elle n'est pas non plus historico-philosophique : elle ne vise pas à étudier l'évolution sémantique des usages du terme associés à un auteur, à un collectif ou à une période historique. Notre approche est technologique, épistémologique et anthropologique. Technologique d'une part, car elle reconnaît les diagrammes comme des objets hybrides, à la fois techniques et logiques, ayant un mode d'existence *sui generis*, situé à la frontière de l'esprit et de la matière, au croisement des sciences de la culture et des sciences de la nature. Épistémologique d'autre part, car il s'agit de comprendre en quoi ces objets techniques graphiques participant de l'invention scientifique sont porteurs de sens. Anthropologique enfin, car réinscrits dans une histoire de la science, de la technique et de la philosophie de longue durée, les diagrammes peuvent peut-être nous permettre de saisir la tendance qui traverse le devenir du propre de l'homme en ce début de 21^e siècle : celui d'être un *homo scriptor* d'un nouveau genre.

2. Catégories de composantes, classes de fonctions et classes d'objets référentiels diagrammatiques

Les diagrammes se présentent à la fois comme des *représentations graphiques* d'autres choses que d'eux-mêmes, mais aussi comme des *objets graphiques* en soi, puisqu'on peut les répertorier en établissant une liste de spécimens. Une première question se pose : si les diagrammes sont des représentations graphiques, de quoi le sont-ils ? Si nous nous référons à la liste de spécimens que nous avons établie, nous pouvons remarquer qu'ils peuvent être la représentation graphique de données statistiques (diagramme en bâtons, diagramme circulaire, diagramme Isotype, diagramme de Kiviat, diagramme de Lexis), la figuration d'une loi (diagramme de forces en statique) ou encore de l'évolution de phénomènes physiques en fonction d'un nombre fini de variables et de paramètres (tous les diagrammes de phases en thermodynamique).

Ils peuvent aussi être des représentations simplifiées d'autres objets, comme en témoignent l'existence de diagrammes dits « floraux » en science naturelle. Ils peuvent aussi représenter une théorie, comme en témoigne le diagramme de Darwin. Ils peuvent modéliser des processus causaux qui nous donnent accès à l'infiniment grand ou petit, comme en témoignent les diagrammes utilisés en physique ou en biologie (diagramme de Feynman, diagramme de Minkowski, diagramme de Penrose-Carter, dogme central de la biologie moléculaire), modéliser des objets formels comme en témoignent les diagrammes utilisés en mathématiques (diagramme commutatif, diagramme de Dynkin, diagramme de Ferrers, diagramme de Hasse, diagramme de nœud en topologie, diagramme sagittal, diagramme de Voronoï, etc.) ou le raisonnement lui-même, comme en témoignent les diagrammes utilisés en logique (diagramme d'Euler, diagramme de Venn, diagramme de Carroll, diagramme de Randolph).

Ils peuvent aussi constituer en eux-mêmes des modes d'emploi, c'est-à-dire des méthodes de construction d'objets (diagramme de tricot) ou des méthodologies de réalisation de performances (cinétographie Laban, diagramme de jonglerie, notation

musicale). Enfin, ils peuvent représenter des outils de classification (diagramme de chromaticité, diagramme de Streckeisen), des outils d'analyse dans le cadre d'un processus de conception en sciences de l'ingénieur (diagramme bête à cornes, diagramme pieuvre, diagramme FAST, méthode SADT) ou des outils d'optimisation en gestion de projet (diagramme d'affinités, diagramme de Gantt, diagramme d'Ishikawa, diagramme PERT).

Nous ne prétendons pas donner une liste exhaustive des spécimens ni des fonctions. Notre démarche s'appuie sur un recueil de types à partir de l'encyclopédie la plus à même de nous en donner le plus grand nombre : *Wikipedia*. Nous avons ainsi consulté les notices allemandes, anglaises, françaises et italiennes de l'encyclopédie mondiale collaborative, ainsi que les thésaurus associés. Nous avons ensuite effectué des comparaisons avec les entrées proposées par les encyclopédies et dictionnaires encyclopédiques généralistes et spécialisés suivants : *Encyclopedia Britannica*¹³⁰, *Encyclopaedia Universalis*¹³¹, *An Etymological Dictionary of Astronomy and Astrophysics*¹³², *MathWorld*¹³³, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*¹³⁴. Les éléments constitutifs d'un diagramme d'après une phénoménologie sommaire des spécimens répertoriés sont :

- Axes
- Blocs
- Concepts
- Couleurs
- Descripteurs
- Dimensions
- Figures (géométriques)
- Flèches
- Formules
- Indices
- Légendes
- Lettres

¹³⁰ <https://www.britannica.com/>

¹³¹ <https://www.universalis.fr/>

¹³² <http://dictionary.obspm.fr/>

¹³³ <https://mathworld.wolfram.com/>

¹³⁴ <https://plato.stanford.edu/>

- Lignes
- Notions
- Paramètres
- Symboles
- Unités de mesure
- Valeurs numériques
- Variables
- Zones délimitées

Un premier constat s'impose : les diagrammes sont des représentations graphiques à la fois composites et complexes. Même lorsqu'elles présentent des composantes linguistiques telles que des notions ou des concepts, elles ne parlent pas d'elles-mêmes ni d'*elles-mêmes* : 1° elles ne parlent pas d'elles-mêmes au sens où elles ne semblent pas exprimer un contenu immédiatement lisible, c'est-à-dire qu'elles ne semblent pas porteuses d'un sens immédiatement accessible à celui que les inspecte ; 2° elles ne parlent pas d'elles-mêmes au sens où ce n'est pas parce qu'elles présentent dans leur espace de configuration des représentations linguistiques comme constituants analytiques que ces composantes linguistiques font parler les diagrammes. Par conséquent, pour un esprit vierge de toute connaissance technique à leur propos, les diagrammes se présentent comme des agrégats sémiotiques à composantes finies dépourvus de sens. L'analyse des spécimens répertoriés nous a permis d'identifier vingt types d'éléments constituant que nous pouvons maintenant rassembler au sein de catégories de composantes¹³⁵ :

- les axes (gradués ou non, orientés ou non) ;
- les blocs (fonctionnels ou non) ;
- les descripteurs (concepts, notions) ;
- les lignes (continues, pointillées, courbes, etc.) ;
- les symboles (flèches, formules, indices, lettres, nombres, pictogrammes, unités de mesure, variables) ;
- les zones (colorées ou non, à géométrie variable, avec légende ou sans légende).

¹³⁵ Selon nous, la dimension d'un diagramme n'est pas une composante interne mais une propriété de son format de représentation.

Ces six catégories de composantes (axes, blocs, descripteurs, lignes, symboles, zones) correspondent selon nous aux catégories graphiques systématiques définitoires de la cohérence interne d'un diagramme appréhendé comme un objet sémiotique, graphique, composite, complexe et concret. Comme un diagramme est aussi une représentation graphique, il faut maintenant déterminer les objets dont les diagrammes sont des représentations graphiques. L'identification des objets associés aux spécimens répertoriés est ce qui nous permettra dans un second temps d'opérer une classification au principe du dégagement d'un nombre fini de classes d'objets dont les diagrammes sont les représentations graphiques. Pour réussir à cibler puis classer les objets dont les diagrammes sont les *lieux tenant*, nous partirons des fonctions instrumentales énoncées plus haut, associées aux spécimens répertoriés. Nous avons réussi à identifier dix fonctions :

- représenter graphiquement des données statistiques ;
- figurer une loi scientifique ;
- représenter l'évolution d'un phénomène ;
- simplifier la représentation d'un objet ;
- représenter une théorie scientifique ;
- modéliser un processus causal, un objet formel ou un raisonnement ;
- constituer un mode d'emploi, c'est-à-dire une méthodologie pour la production d'un objet ou la réalisation d'une performance ;
- être un outil de classification ;
- être un outil d'analyse ;
- être un outil d'optimisation.

Que ce soit pour représenter des données statistiques (diagrammes en bâtons, diagrammes circulaires, etc.), figurer une loi scientifique (diagramme de forces en mécanique) ou modéliser un processus causal (diagramme de Feynman), les objets dont les diagrammes sont les lieux tenant sont les objets scientifiques au sens strict, c'est-à-dire les objets justiciables d'une quantification, à savoir les grandeurs mesurables des sciences de la nature ou les objets phénoménologiques quantifiables des sciences humaines et sociales, qui *in fine*, sont toujours réductibles à des nombres, et donc potentiellement

manipulables par des calculs. Dans cette perspective, un diagramme est un outil de représentation graphique de ce qui est mesurable et mesuré, calculable et calculé. Les deux premières catégories d'objets dont les diagrammes sont les expressions graphiques en tant que représentations (et non en tant qu'objets) sont donc les suivantes : 1° les grandeurs mesurables ; 2° les objets phénoménologiques quantifiables.

On pourrait croire que les diagrammes floraux ne sont pas des diagrammes, mais des schémas légendés permettant de saisir les parties essentielles des spécimens étudiés (et leur configuration structurale) car leur manipulation ne permet aucun calcul, aucune prédiction ni aucune observation de tendances liées à l'évolution de variables quantitatives qu'on peut associer à des grandeurs évolutives. Ce n'est en réalité pas le cas, car ils possèdent un algorithme qui règle leur construction.

En ce qui concerne la représentation d'une théorie scientifique, on peut constater dans le cas du diagramme de Darwin qu'il est peut-être le seul diagramme à représenter une théorie unifiée en science, car même le modèle standard de la physique des particules, auquel on peut associer des groupes de symétries mathématiques, mais qui ne parvient toujours pas à produire l'unification théorique souhaitée de la physique, se présente comme un tableau classificatoire et non comme un diagramme. Toujours dans le cas du diagramme de Darwin, nous montrerons que celui-ci révèle qu'il est un *modèle* permettant de simuler des scénarios évolutionnaires à travers sa manipulation et d'associer les effets de recoupements qu'il permet de produire à des conséquences observables dans la nature. Dans ce cas précis, l'objet associé au diagramme est un phénomène complexe aux dimensions gigantesques, à savoir le mécanisme régissant l'évolution de toutes les espèces vivantes, dont le diagramme de Darwin est le modèle compacté.

Lorsqu'un diagramme est solidaire d'un système de notations, il n'est plus seulement une représentation graphique à laquelle il faut adjoindre un mode d'emploi pour en comprendre la signification, il constitue à lui seul en tant qu'objet graphique une méthodologie à laquelle on peut associer la génération potentielle des objets ou des

processus actuels dont il représente la classe virtuelle. Un diagramme codifié dans un système de notations a donc pour classes d'objets associées : 1° celle des objets manufacturés, c'est-à-dire la classe des objets concrets et construits par une intelligence lectrice qui en lisant sait faire ; 2° celle des performances en tous genres, c'est-à-dire la classe des objets temporels qui concordent avec leur actualité, soit les actions dont l'événementialité est fonction de la durée de leur actualité (temps d'énaction d'un script théâtral par un comédien, performance scénique d'un danseur ou d'un jongleur, interprétation d'une œuvre musicale par un orchestre ou un soliste, etc.). La lecture bien comprise et bien entreprise d'un diagramme équivaut alors à la mise en œuvre d'un savoir-faire producteur ou performant. Ce qui révèle que le diagramme est un support d'instrumentation et de production du savoir-faire créateur, que celui-ci soit technique, artistique ou scientifique.

Si une représentation graphique produit une représentation structurée et systématique d'un ensemble de propriétés ou de connaissances à propos d'un domaine d'objets étudié par une science, une telle représentation graphique n'est selon nous pas un diagramme mais un tableau classificatoire, même si sa forme ne permet pas de l'associer spontanément à un tableau. Tel est par exemple le cas d'un diagramme pétrologique tel que le diagramme de Streckeisen, dont la forme géométrique apparente n'est pas celle d'un tableau, mais dont la structure est celle d'une classification ordonnée par des relations systématiques entre les cellules qui la composent. Un outil graphique de classification dont on dit que c'est un diagramme est en réalité un tableau dont la forme géométrique peut varier.

Les diagrammes utilisés en gestion de projet tels que le diagramme PERT, le diagramme de Gantt ou le diagramme d'Ishikawa sont plus des outils heuristiques visant à rationaliser et optimiser la mise en œuvre de tâches dans des projets de diverses natures, qu'ils soient individuels ou collectifs. Ce ne sont pas des machines sémiotiques productrices de prédictions, de calculs, d'objets ou de processus. Ce sont plutôt des

méthodes visant à corriger des disfonctionnements constatés *a posteriori* : leur vertu est donc rétrodictive.

Nous obtenons donc six catégories de composantes diagrammatiques, cinq classes d'objets auxquelles sont associés les diagrammes en tant que représentations graphiques objectives. On peut dès lors déterminer les classes de fonctions des diagrammes comme représentations objectives, qui peuvent permettre dans un second temps de calculer le nombre de leurs classes de complexité dans le cadre d'une analyse combinatoire. Représenter graphiquement des données statistiques, figurer une loi scientifique ou représenter l'évolution d'un phénomène peuvent être regroupés sous une même fonction : celle consistant à permettre de visualiser des mesures pour en dégager la signification phénoménologique. On peut nommer une telle fonction *fonction phénoménologique* au sens où un diagramme permet grâce à cette fonction de donner une signification phénoménologique à un contenu scientifique, c'est-à-dire à un ensemble de mesures plus ou moins riche et complexe.

En produisant la simplification de la représentation d'un objet ou la représentation d'une théorie, on peut voir à l'œuvre un second type de fonction assurée par un diagramme : celle de produire une invariance d'échelle. On peut nommer cette fonction : *fonction fractale*. Comme un diagramme peut aussi fonctionner comme un modèle corrélatif à une théorie scientifique, un troisième type de fonction peut le caractériser : sa *fonction modélisatrice*. Comme un diagramme peut constituer en lui-même une méthode de construction ou d'actualisation, il peut revêtir une *fonction méthodologique*. Enfin, comme un diagramme peut être un outil analytique permettant d'optimiser la mise en œuvre d'un projet, le diagramme peut revêtir une *fonction correctrice*. Ainsi, on dénombre cinq classes de fonctions que peuvent endosser les diagrammes comme représentations graphiques.

2.1 Les axes

Au sens premier du terme, un *axe* désigne une pièce qui passe par le centre d'un corps pour lui permettre de tourner sur lui-même. C'est une pièce rectiligne autour de laquelle tourne une ou plusieurs autres pièces de ce corps. C'est par exemple l'axe autour duquel tourne une roue. Le sens premier de la notion est donc mécanique. Dans le domaine des représentations graphiques, un axe peut conserver son sens rotatif originel car il est ce qui permet en géométrie de décrire une rotation dans l'espace, mais il est aussi ce qui sert à construire une symétrie dans le plan. On parle alors d'*axe de symétrie*. C'est par exemple une symétrie d'axe p comme dans le cas de la symétrie axiale suivante :

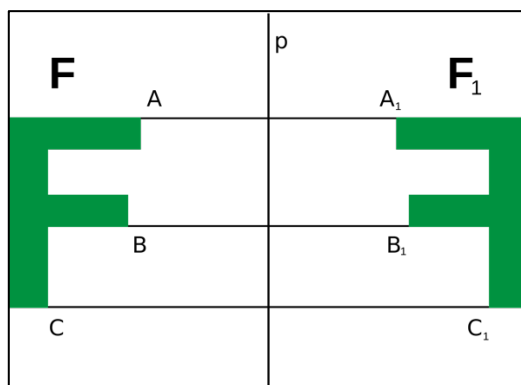


Figure 36 : Symétrie axiale¹³⁶

Mais en analyse, un axe désigne une droite avec une orientation, une origine et une unité souvent désignée par une lettre de l'alphabet. De plus, cette droite peut être graduée, car la graduation de l'axe est ce qui permet de représenter les valeurs numériques d'une grandeur dans une unité de mesure, celles d'une variable, ou même plus simplement encore, l'évolution de la valeur d'un paramètre dont on ne cherche pas forcément à représenter les valeurs numériques. On parle ainsi de *repère dans le plan* lorsque deux axes se recoupent. Si les droites orientées qui définissent les axes sont

¹³⁶https://fr.wikipedia.org/wiki/Sym%C3%A9trie_axiale#/media/Fichier:Reflection_symmetry.svg

perpendiculaires, le repère est dit orthonormal. De plus, si les axes sont au nombre de trois et perpendiculaires deux à deux, le repère est dit dans l'espace et orthonormal :

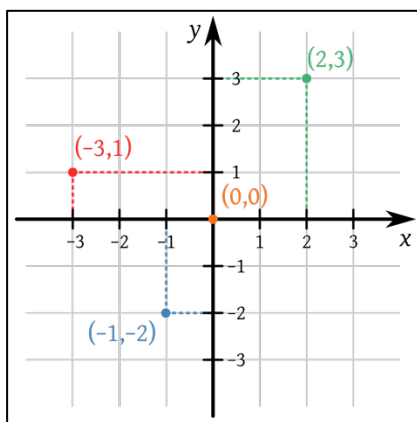


Figure 37 : Repère dans le plan

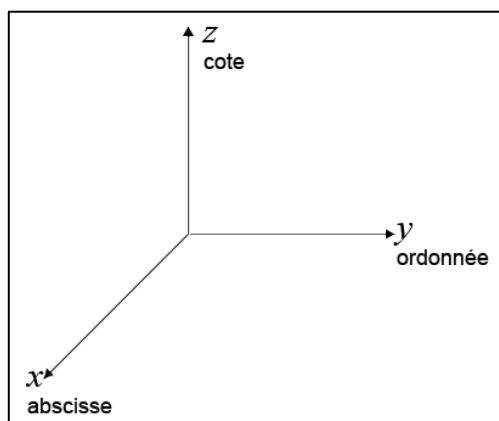


Figure 38 : Repère dans l'espace

La composante axiale peut être présente ou absente. Lorsqu'elle est présente, elle peut varier en nombre, d'un à trois axes tout au plus, comme en témoigne la collection sur laquelle nous travaillons. Comment cette composante se matérialise-t-elle graphiquement ?

En inspectant les diagrammes possédant d'un à trois axes, on peut remarquer que cette composante se matérialise par une droite, qui peut d'ailleurs être fléchée. Elle peut être verticale (comme dans le cas du diagramme d'orbitales moléculaires), horizontale (comme dans le cas d'un diagramme de Feynman), transversale (comme dans un diagramme ternaire) ou à segments multiples (comme dans le diagramme de Latimer où

l'axe est une flèche à trois segments). Deuxièmement, un axe n'est pas toujours matérialisé par une droite, mais peut aussi être matérialisé par des paliers ou des strates (comme dans le diagramme de Darwin). Lorsque c'est une droite, celle-ci n'est pas nécessairement fléchée (comme dans un diagramme ternaire, un diagramme Isotype ou un diagramme de Hertzsprung-Russell). Enfin cette droite peut être graduée (comme dans les diagrammes à bâtons, les diagrammes de phases, les diagrammes ternaires, les diagrammes de Ramachandran et les diagrammes de Hertzsprung-Russell) ou ne pas l'être (comme dans un diagramme de Feynman, un diagramme de Latimer ou dans la représentation générale d'un diagramme de phases comme par exemple un diagramme de phases généralisé). Lorsqu'un axe est gradué, il rend possible la représentation graphique des valeurs d'une variable (comme dans un diagramme en bâtons) ou les valeurs numériques d'une grandeur quantifiable dans une unité de mesure (comme dans un diagramme de phases, un diagramme ternaire ou un diagramme de Hertzsprung-Russell).

2.2 Les blocs

Au sens premier du terme, c'est-à-dire propre, un *bloc* désigne un morceau de matière pesante. Au sens figuré, il désigne l'élément partitif d'un *assemblage* de plusieurs choses plus ou moins solidaires, structurées et organisées les unes par rapport aux autres. Un assemblage de blocs produit un *conglomérat* lorsqu'il rassemble des objets hétéroclites non structurés, ou alors une *construction* au sens strict, lorsque cet assemblage est *structuré*. La richesse de composition et de structuration d'un tel assemblage définit quant à elle le *degré de complexité* d'une construction.

On appelle bloc d'un diagramme une classe de composante diagrammatique. Un diagramme peut comporter des blocs ou ne pas en comporter. Lorsqu'il comporte des blocs, ceux-ci peuvent varier dans leur forme. En effet un bloc peut être matérialisé graphiquement par une courbe fermée (cercle, ovale, etc.) ou un quadrilatère (comme dans un diagramme d'influence) si le bloc est représenté dans le plan. Ces formes

géométriques, pour avoir la fonction de blocs dans un diagramme, doivent toujours être fermées et disjointes, car un diagramme de courbes entrelacées définit un type de diagramme et non une composante diagrammatique : en l'occurrence le *diagramme de nœud*. Un bloc, en tant que composante diagrammatique, peut alors représenter le sommet d'un réseau (comme dans un diagramme de Hasse), la source ou la cible d'une flèche (comme dans un diagramme d'influence) ou la représentation d'une fonction dans un système, comme c'est le cas dans les diagrammes utilisés dans les méthodes et langages de modélisation des sciences de l'ingénieur (diagrammes UML, diagrammes FAST, SADT, etc.) mais aussi en biologie relationnelle (où la modélisation est aussi systémique, car inspirée des sciences de l'ingénieur). Un bloc peut être spécifié par un descripteur, une notion ou un concept désignant une classe logique (comme dans un diagramme d'Euler ou de Venn) ou une fonction systémique (comme dans un diagramme en ingénierie), mais aussi par un symbole (comme dans un diagramme d'influence, un diagramme de Hasse, etc.).

Le bloc d'un diagramme peut représenter les combinaisons de parties d'un ensemble ordonné (diagramme de Hasse), encercler des entités qui peuvent être nommées par des catégories (diagramme d'influence), représenter les fonctions d'un système technique ou biologique (diagramme de blocs), représenter des classes ou des attributs (diagrammes de Venn) ou encore des objets théoriques sur lesquels raisonner (par exemple un espace-temps dans un diagramme de Penrose-Carter). Les blocs peuvent être reliés par des lignes, pointillées ou continues, droites ou courbes, orientées ou non.

Il faut distinguer diagrammes avec blocs et diagrammes de blocs. Alors que les diagrammes avec blocs ne sont pas nécessairement des diagrammes de blocs et peuvent représenter des diagrammes de types différents, un *diagramme de bloc* est un type à part entière associé à un langage de modélisation graphique (comme UML ou SysML). Le « diagramme de définition de bloc » (*Block Definition Diagram*) permet de « définir la structure d'un système, d'un sous-système ou d'un composant ». Dans ce type de

diagramme les blocs peuvent « représenter des entités physiques ou logiques. Ils sont décomposables, ils peuvent posséder des propriétés et un comportement¹³⁷ ».

2.3 Les descripteurs

Diverses fonctions peuvent être attribuées aux descripteurs : fixer la signification des axes, blocs, lignes, zones et symboles, donner un sens phénoménologique aux objets étudiés, expliciter le mode d'emploi d'un diagramme ou sa légende, etc. Les descripteurs définissent la composante sémantique d'un diagramme : ce sont les notions et concepts qui permettent de donner un sens aux différentes composantes. Ils définissent l'espace linguistique d'un diagramme. Si les descripteurs donnent des indications sémantiques sur la signification des composantes, ils ne permettent pas à eux seuls de faire parler un diagramme et d'en révéler la signification opératoire. Pour cela, le diagramme doit être muni d'énoncés linguistiques qui explicitent son sens et sa fonction comme machine sémiotique et les connaissances du domaine auquel il est associé en tant qu'outil graphique. Ces énoncés linguistiques peuvent être structurés sous formes de légendes, de modes d'emploi ou encore de théories scientifiques. En effet, on ne peut pas comprendre le diagramme de Darwin sans un minimum de prérequis sur la théorie de l'évolution, on ne peut pas comprendre un diagramme de jonglerie sans un mode d'emploi, on ne peut pas comprendre un diagramme de Feynman sans un minimum de connaissances en physique des particules, etc. Si tel est le cas, doit-on cependant réduire les diagrammes à des outils de spécialistes inaccessibles à qui ne maîtrise pas les connaissances des domaines auxquels ils sont associés ? Nous discuterons cette question dans la suite du mémoire.

¹³⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_d%C3%A9finition_de_bloc

2.4 Les lignes

Le diagramme, vu sous l'angle de la représentation graphique comme une machine sémiotique, est un système de lignes différenciées¹³⁸. D'une certaine manière, on peut dire que toutes les composantes diagrammatiques sont linéaires au sens où elles correspondent à des traits apposés sur une surface de représentation graphique. En effet un axe est une ligne orientée, un bloc un ensemble de lignes fermées, un descripteur un assemblage de lignes pourvues de signification relativement à un système de notations écrites. Un symbole est une ligne plus ou moins torsadée à laquelle on a conféré une signification conventionnelle. Enfin une zone est un ensemble de lignes fantomatiques dessinées par ses frontières. Mais la ligne comme composante diagrammatique doit être distinguée de l'aspect linéaire inhérent à toutes les autres composantes, car elle désigne la catégorie de composante diagrammatique qui permet de mettre en rapport l'ensemble des autres composantes : comme le sang, la lymphe et les tissus conjonctifs dans l'organisme vivant, les lignes constituent le fond à partir duquel s'organisent toutes les autres composantes de la machinerie diagrammatique. Les lignes comme composantes sont les liants et les révélateurs d'un diagramme : elles permettent de distinguer son fond de sa forme sémiotique.

2.5 Les symboles

Les symboles peuvent être de divers ordres : symboles de variables en tous genres (logique, mathématique, physique, taxonomique, etc.), d'unités de mesure physiques, d'éléments chimiques, d'opérations arithmétiques ou algébriques. Ils peuvent aussi correspondre à des éléments pictogrammatiques pouvant être explicités dans des légendes (comme dans un diagramme Isotype) ou encore à des lettres alphabétiques (chiffres arabes ou romains tels qu'on peut en observer dans le diagramme de Darwin) généralisant

¹³⁸ Tim Ingold a proposé une histoire et une classification des lignes dans l'ouvrage suivant : T. Ingold, *Une brève histoire des lignes*, S. Renaut (trad.), Bruxelles, Zones Sensibles, 2013.

des classes d'objets, d'opérations ou de variables. Ils participent de systèmes de notations symboliques qui peuvent être explicités par des légendes et compactent spatialement de l'information pour la rendre accessible et manipulable par les yeux et la main du lecteur.

2.6 Les zones

Les zones, dernière catégorie de composante diagrammatique, permettent de visualiser et d'observer des changements, des bifurcations ou encore des transformations de phénomènes lorsque le diagramme fonctionne comme un modèle théorique. Si on lui pose une question, le diagramme répond. Il fonctionne alors comme une machine sémiotique, schématique dans sa présentation synoptique, mais calculatoire dans sa manipulation dynamique. Les zones sont délimitées par des frontières qui peuvent être matérialisées par des lignes critiques. Elles permettent d'identifier des domaines de stabilité, de constance ou de régularité relatifs à des phénomènes modélisés (comme dans les diagrammes de phases en thermodynamique) ou l'évolution de phénomènes en fonction de l'évolution de la valeur de variables ou de paramètres dépendants (comme dans un diagramme de Minkowski ou dans le diagramme de chromaticité). Les zones matérialisent graphiquement les variations qualitatives induites par l'évolution de variables quantitatives dépendantes. Elles permettent de donner un sens qualitatif et une expression *phénoménographique* (car phénoménologiquement formatée par un format de représentation graphique) à des mesures ou des lois phénoménales exprimées graphiquement suivant des conventions interprétatives et des formats techniques de manipulation graphique.

3. Pseudo-diagrammes

3.1 Les représentations graphiques de données

3.1.1 Le diagramme en bâtons : un premier exemple de pseudo-diagramme

Les diagrammes en bâtons, inspirés par les tableaux chronologiques de Joseph Priestley introduits en 1765, apparaissent pour la première fois dans le *Commercial and Political Atlas* de William Playfair publié en 1786, notamment avec le célèbre diagramme de l'activité d'import-export de l'Écosse telle qu'on peut l'observer à travers l'activité du port d'Édimbourg¹³⁹. Un diagramme en bâtons est un diagramme présentant des bandes dont les bases sont réduites à des points. Il repose sur la proportionnalité entre la hauteur d'une bande et la valeur associée à elle, ce qui permet de représenter la mesure d'un caractère étudié. On parle de *diagrammes en tuyaux d'orgues* lorsque la base s'épaissit pour laisser place à des bandes rectangulaires. Ces diagrammes peuvent être à une dimension, et représentent alors des caractères face à leur fréquence. Si c'est le cas, la largeur du tuyau n'a aucune signification (elle doit simplement être constante pour chaque caractère étudié). Ils peuvent être à deux dimensions, lorsqu'ils présentent simultanément une dimension quantitative et qualitative d'un caractère étudié. Par exemple, on peut au moyen d'un diagramme en tuyaux d'orgues exposer simultanément le taux de scolarisation selon les pays (dimension quantitative) et le taux de scolarisation selon l'enseignement (dimension qualitative) :

¹³⁹ J. R. Beniger & D. L. Robyn, « Quantitative Graphics in Statistics: A Brief History », *The American Statistician*, vol. 32, n° 1, 1978, p. 1-11.

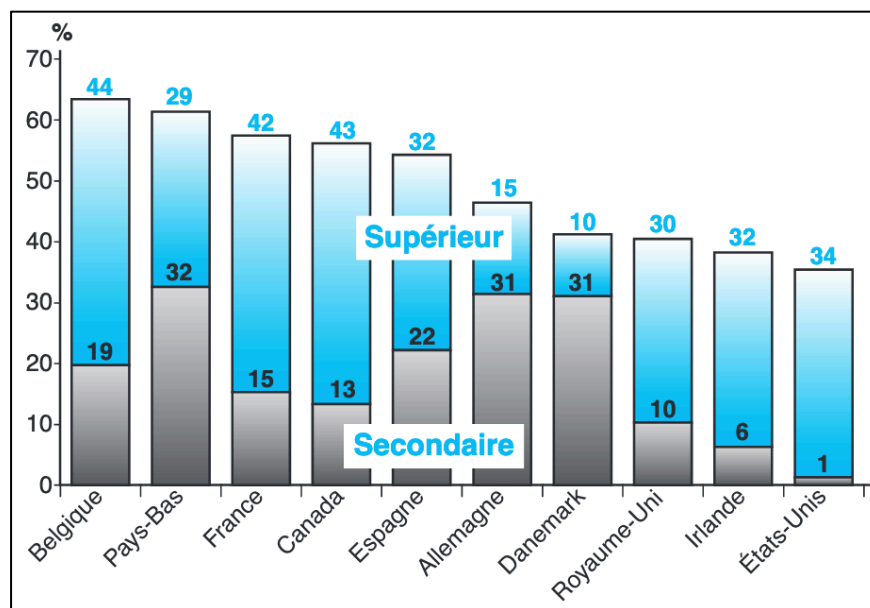


Figure 39 : Diagramme en tuyaux d'orgues à deux dimensions du taux de scolarisation à 20 ans selon les pays et niveaux d'enseignement en 1996¹⁴⁰

Ce qui importe, c'est la hauteur du tuyau, qui indique la valeur de la fréquence du caractère observé. Lorsqu'il représente une série statistique, chaque rectangle représente un individu et la valeur qui lui est associée, la hauteur du rectangle étant proportionnelle à la valeur. Lorsqu'il représente une distribution statistique, chaque rectangle représente une valeur et sa fréquence, la hauteur du rectangle étant proportionnelle à la fréquence. Lorsque l'aire de chaque bande rectangulaire est proportionnelle à la fréquence de la classe qu'elle représente, le diagramme est un *histogramme*. Un histogramme se distingue d'un diagramme en tuyaux d'orgues en ce sens qu'il est fondé sur l'exploitation de la surface graphique, et non simplement de la hauteur.

¹⁴⁰ B. Py, *La statistique sans formule mathématique*, 2^e éd., Paris, Pearson Education, 2010, Fig. 3.3, p. 68.

3.1.2 Le diagramme de Pareto : un graphique qui outille la décision

Il existe une loi dite de Pareto, car découverte par l'économiste italien Vilfredo Pareto, qui énonce que 80% des effets proviennent de 20% des causes. C'est donc une loi statistique causale. Elle peut s'appliquer à la démarche qualité, aux chiffres d'affaires, à l'économie, etc. Il s'avère que cette loi peut être transformée en un diagramme, qu'on appelle le *diagramme de Pareto*, ce qui lui permet d'accéder au statut d'outil graphique. Faisons une étude de cas en partant de la situation dans laquelle se trouve une entreprise pour comprendre la fonction d'un tel diagramme et savoir si le diagramme de Pareto est véritablement un diagramme.

Le service qualité d'une entreprise de confection de chemises rassemble des données relatives à son atelier de fabrication sur une période de cinquante jours¹⁴¹. Ces données font apparaître un taux de retouches de l'ensemble de la production jugé trop élevé par la direction. Ayant pris acte de ce constat, l'entreprise décide alors d'opérer une action corrective consistant à donner la priorité aux types de retouches qu'elle juge les plus importants. Trois étapes président à la réalisation du diagramme de Pareto d'une telle situation : 1° l'organisation des données recueillies ; 2° leur traitement ; 3° la construction du diagramme.

Dans un premier temps on classe les données dans un tableau à trois colonnes où sont répertoriés la référence de produit, le type de réparation et la quantité de produits retouchés par référence. Dans cette situation, cela donne par exemple :

¹⁴¹ Source de l'exemple analysé : https://www.youtube.com/watch?v=eWR44bXc_wo

Référence	Type de réparation	Quantité
A	Montage du poignet	3639
B	Boutonnière	666
C	Tissu	132
D	Bouton	389
E	Ourlet du bas de chemise	313
F	Montage du col de chemise	4583
G	Surpiquage du col de chemise	846
H	Empiècement	152
I	Plaquage du col de chemise	2168
J	Autres réparations	67

Figure 40 : Tableau de données pour la construction d'un diagramme de Pareto

À partir de ce premier tableau, on en construit un second, à quatre colonnes cette fois-ci, puisqu'on cherche à calculer le taux de défectuosité de la production par type de réparation. Une fois tous les taux calculés, on les classe par ordre décroissant. Dans la situation étudiée, cela donne alors le tableau suivant :

Référence	Type de réparation	Quantité	%
F	Montage du col de chemise	4583	35
A	Montage du poignet	3639	28
I	Plaquage du col de chemise	2168	17
G	Surpiquage du col de chemise	846	6
B	Boutonnière	666	5
D	Bouton	389	3
E	Ourlet du bas de chemise	313	2
H	Empiècement	152	1
C	Tissu	132	1
J	Autres réparations	67	0,5
Total		12955	100

Figure 41 : Tableau de données réordonné pour la construction d'un diagramme de Pareto

On peut dès lors construire le diagramme de Pareto associé à une telle situation :

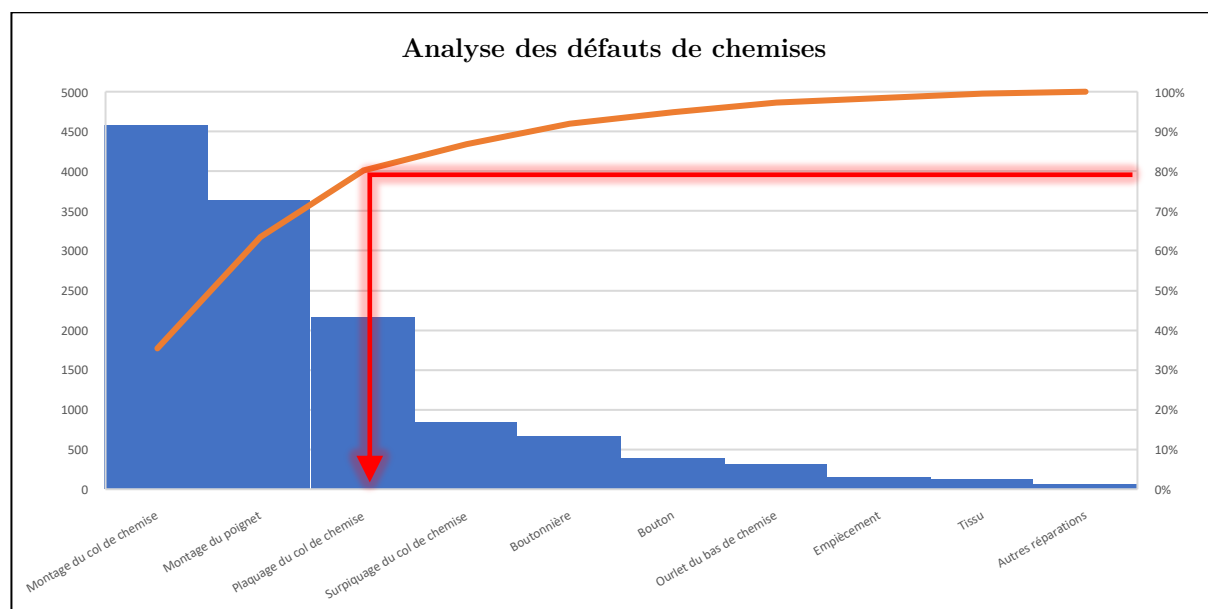


Figure 42 : Diagramme de Pareto

À partir de la loi des 80/20, le tracé de la flèche rouge, qui matérialise la loi de Pareto à l'œuvre dans le cas de la chaîne de production de cette entreprise de fabrication de chemises, on peut déduire de la lecture du diagramme que l'essentiel de l'attention de l'entreprise doit être porté sur le montage du col de chemise, le montage du poignet et le plaquage du col si elle souhaite adopter l'ordre de priorité le plus rationnel dans le traitement des types de retouches de l'ensemble de sa production défectueuse. Dans ce cas particulier, le diagramme de Pareto se révèle être un outil d'aide à la décision car il permet de mettre en application une méthode corrective optimisée. Mais s'agit-il vraiment d'un diagramme ?

Selon nous non. Le diagramme de Pareto n'a de diagrammatique que le nom, car :
 1° il n'est pas fondé sur des connaissances pratiques, mais sur des données numériques ;
 2° il permet, à partir de la connaissance d'une loi, l'interprétation d'une représentation graphique des données provenant d'une situation particulière qui tombe sous cette loi. Ce n'est donc pas une machine sémiotique, mais une représentation graphique de données. Il ne s'agit donc pas d'un diagramme, mais d'un *graphique*. Ainsi, cette étude de cas nous permet d'exclure tout un ensemble de représentations graphiques qui portent le nom de diagrammes alors qu'il s'agit en réalité de graphiques représentant des données statistiques. Autrement dit : toute représentation graphique de données utilisée en statistiques n'est pas un diagramme mais un *graphique*.

3.2 Les cartogrammes

3.2.1 Le diagramme de Hertzsprung-Russell : une représentation cartogrammatique d'un tableau

Introduit au début du 20^e siècle par Ejnar Hertzsprung et Henry Russell, le diagramme de Hertzsprung-Russell (ou diagramme H-R) est l'outil graphique utilisé en astrophysique pour classer les étoiles et leur évolution. Dans ce diagramme, l'axe des ordonnées indique la luminosité intrinsèque d'une étoile (mesurée en luminosité solaire),

tandis que l'axe des abscisses indique trois autres caractéristiques et paramètres reliés entre eux¹⁴² : le type spectral, la couleur et la température effective (proche de la température de surface mesurée en Kelvin).

En plaçant progressivement des étoiles sur le diagramme H-R, les astrophysiciens ont remarqué qu'elles se regroupaient selon plusieurs grands motifs¹⁴³. Ils ont ainsi identifié quatre groupes principaux d'étoiles répartis dans quatre zones distinctes :

- la zone de la séquence principale ;
- celle des étoiles géantes ;
- celle des supergéantes ;
- et enfin celle des naines blanches.

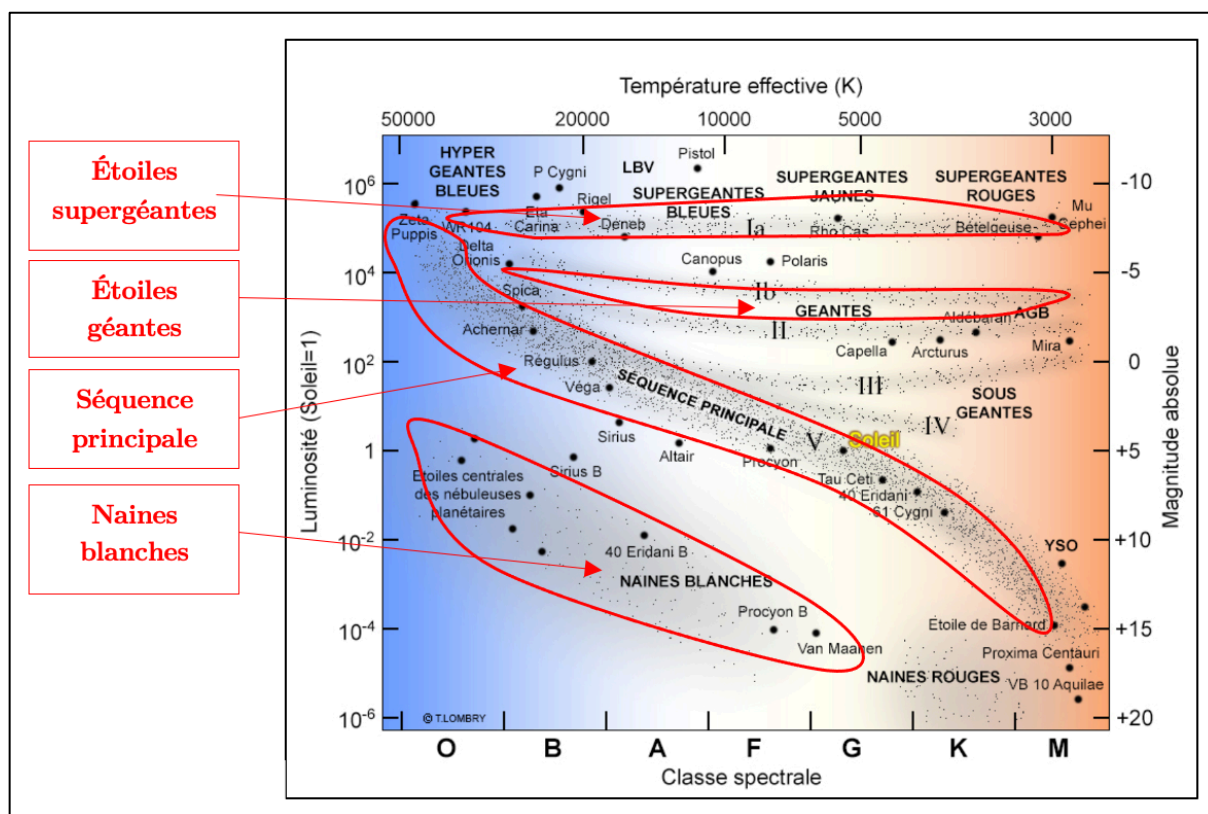
Ils ont pu ensuite associer ces groupes aux différents moments du cycle de vie des étoiles, car il s'est avéré que leur position sur le diagramme a une signification opératoire, puisqu'elle permet de déduire des informations sur de nombreuses caractéristiques (le rayon, la masse, la composition chimique, l'évolution temporelle, l'âge, la fin de vie). Par exemple, on sait maintenant qu'une étoile comme le Soleil a une durée de vie d'environ dix milliards d'années.

Les étoiles passent la plus grande partie de leur existence sur la séquence principale, durant laquelle elles brillent sous l'effet de la fusion de l'hydrogène dans leur noyau, ce qui a pour conséquence de produire de l'hélium¹⁴⁴. Dans cette zone du diagramme, il existe une corrélation entre la luminosité et la température. Cela signifie que sur la séquence principale les étoiles les plus brillantes sont aussi les plus chaudes. Cette relation n'est cependant pas systématique, car elle n'existe que pour les étoiles de cette zone. La partie supérieure gauche de la séquence principale contient ainsi des étoiles qui sont plus massives que le Soleil (c'est le contraire pour sa partie inférieure droite) :

¹⁴² J. Airey & U. Eriksson, « Unpacking the Hertzsprung-Russell Diagram: A Social Semiotic Analysis of the Disciplinary and Pedagogical Affordances of a Central Resource in Astronomy », *Designs for Learning*, 11(1), 2019, p. 103.

¹⁴³ *Ibid.*

¹⁴⁴ *Ibid.*

Figure 43 : Diagramme de Hertzsprung-Russell¹⁴⁵

Les lettres O, B, A, F, G, K, M placées sur l'axe horizontal se réfère au système de classification de Harvard des types spectraux, qui permet de classer les étoiles en température des types les plus chauds (O) aux types les plus froids (M). Le système permet d'identifier une relation entre la température et la couleur des étoiles. En effet les étoiles chaudes sont bleues, tandis que les étoiles froides sont rouges, comme l'indique ce tableau de correspondance :

¹⁴⁵ <http://www.astrosurf.com/luxorion/Images/diagramme-hr.jpg> (Figure modifiée)

Type	Température	Couleur conventionnelle	Raies d'absorption
O	> 25 000 K	Bleue	Azote, carbone, hélium et oxygène
B	10 000 – 25 000 K	Bleue-blanche	Hélium, hydrogène
A	7 500 – 10 000 K	Blanche	Hydrogène
F	6 000 – 7 500 K	Jaune-blanche	Métaux : fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	5 000 – 6 000 K	Jaune (comme le Soleil)	Calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 500 – 5 000 K	Orange	Métaux et monoxyde de titane
M	< 3 500 K	Rouge	Métaux et monoxyde de titane

Figure 44 : Tableau des types spectraux (classification de Harvard)¹⁴⁶

3.2.2 Le diagramme Isotype : une carte de données qui commence à fonctionner

On doit à Otto Neurath l'invention dans les années 1920 de la « Méthode viennoise de statistique par l'image » (*Wiener Methode der Bildstatistik*), le système graphique d'information renommé plus tard Isotype (*International System Of Typographic Picture Education*). Neurath et son équipe se tournent vers le monde ouvrier en s'appuyant sur les sciences sociales et les doctrines socialistes. Pour surmonter les problèmes d'alphabétisation au sein du prolétariat, il décide qu'on communique dans les expositions avec des diagrammes. Dans ce contexte, il conçoit avec Marie Reidemeister la statistique en image (*Bildstatistik*) grâce à l'invention du système de notation visuel nommé ISOTYPE (*International System Of Typographic Picture Education*). Tous deux élaborent des techniques de visualisation appropriées des faits économiques et sociaux, afin de promouvoir une pédagogie par l'image. Les diagrammes Isotype deviennent les moyens grâce auxquels transmettre des connaissances aux individus des classes défavorisées et peu instruites afin d'initier un mouvement de critique sociale fondé sur

¹⁴⁶ Nous avons reconstruit le tableau dont la source est : https://fr.wikipedia.org/wiki/Type_spectral

des données empiriques réelles. C'est au "Salon de la Santé, de la Protection Sociale et du Sport", plus connu sous l'acronyme GeSoLei (*GE*sundheit*SP*flege, *SO*ziale *F*ürsorge und *LE*ibesübungen), qui se tient à Düsseldorf du 8 mai au 15 octobre 1926, que Neurath découvre les gravures de l'artiste Gerd Arntz. Elles retiennent son attention et deviennent la source d'inspiration des moyens pictographiques destinés à concrétiser les éléments symboliques du système Isotype. L'enjeu est de sensibiliser un public populaire sur des questions sociales qui vont de l'hygiène personnelle au fonctionnement de l'économie globale, grâce à un langage composé de signes graphiques non verbaux. Ce système symbolique forme le support d'une « raison » qui n'est plus seulement « graphique », mais aussi « visuelle¹⁴⁷ ».

La stratégie est la suivante : plutôt que de représenter des données précises avec des chiffres à virgules qui provoquent peu d'impression visuelle, on répète l'occurrence d'un pictogramme dont la fonction est de représenter une quantité globale de sorte que la sériation spatiale des occurrences graphiques laisse apparaître des différentiels perceptibles. Par exemple, plutôt que de connaître le nombre exact de migrants occidentaux dans les années 1920, on peut se représenter simultanément le solde migratoire de différents pays au moyen d'une planche composée de pictogrammes Isotype :

¹⁴⁷ D. Lelarge, *L'encyclopédie sociale d'Otto Neurath : la raison visuelle*, Paris, L'Harmattan, 2009. Voir aussi : F. Ferri, « Recension de : D. Lelarge, *L'encyclopédie sociale d'Otto Neurath : la raison visuelle*, Paris, L'Harmattan, 2009 », Notice n° 3334 du *Système d'information en philosophie des sciences*. <https://sips.univ-fcomte.fr/>

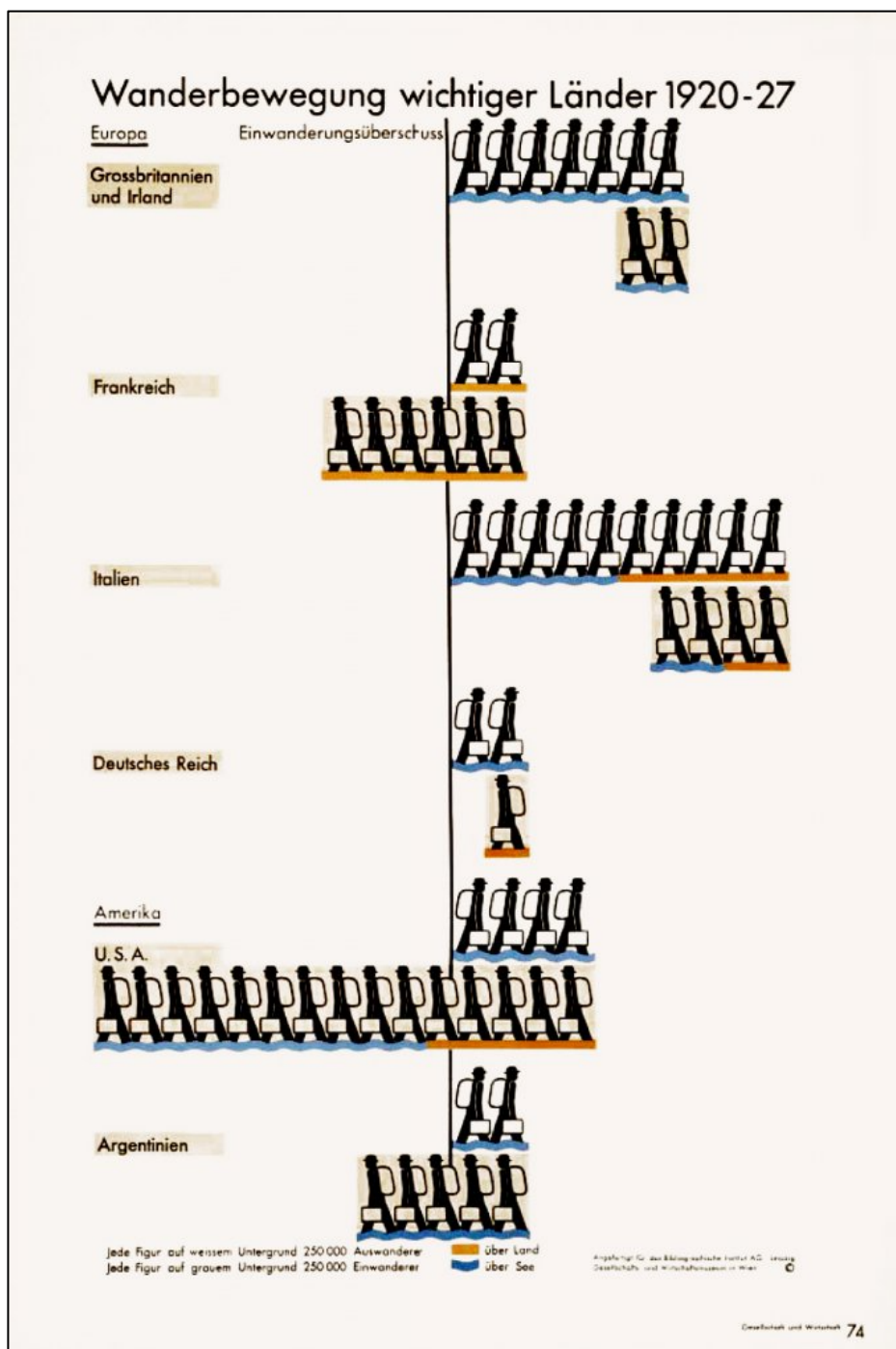


Figure 45 : Exemple de diagramme Isotype -
 Planche 74 « Mouvements migratoires de pays importants 1920-27 »¹⁴⁸

¹⁴⁸ O. Neurath, *Gesellschaft und Wirtschaft. Bildstatistisches Elementarwerk*, Leipzig, Bibliographisches Institut, 1930.

La planche permet de comparer des masses d'objets et leur évolution dans le temps. De part et d'autre de l'axe central, on peut observer des rangées de pictogrammes disposées suivant un axe longitudinal qui présente deux directions. Chaque pictogramme représente environ 250 000 migrants. La lecture succincte de la légende, qui nous donne les informations sur les quelques conventions interprétatives adoptées (les deux couleurs choisies et la valeur approximative mais entière de l'étalon de mesure) permet ensuite en trois coups d'œil de saisir trois types d'informations importantes : 1° le solde migratoire des pays considérés grâce à la perception de l'équilibre ou du déséquilibre entre émigrés et immigrés de part et d'autre de l'axe central ; 2° les différentiels de masses en mouvement ; 3° les différentiels de masses en mouvement suivant les voies migratoires adoptées (déplacement terrestre ou maritime). On a bien affaire à un diagramme, car on accède grâce à cette planche à des différentiels et des relations dynamiques qui font sens une fois connues les conventions interprétatives qui permettent de le lire. Ce diagramme ne donne pas accès à des opérations, ce qui ne nous empêche cependant pas de le faire fonctionner. C'est donc bien une machine graphique, car elle produit de l'information dès qu'elle est mise en marche par l'esprit qui en connaît le mode d'emploi.

4. Quasi-diagrammes

4.1 Représenter des ensembles ordonnés : le diagramme de Hasse

Soient E_1, E_2, \dots, E_n des ensembles. Une relation n -aire est la donnée d'un sous-ensemble de $E_1 \times E_2 \times \dots \times E_n$, soit d'un ensemble de n -uplets (a_1, a_2, \dots, a_n) . On peut représenter une relation n -aire en donnant la liste des n -uplets dans un tableau ayant n colonnes. Prenons deux ensembles finis E_1 et E_2 où $n = 2$ et où les deux ensembles considérés sont identiques, c'est-à-dire tels que $E_1 = E_2 = E$. On appelle relation binaire sur l'ensemble E une proposition qui est vraie pour certains couples $(x, y) \in E \times E$ et fausse pour les autres. Le graphe de la relation binaire R est l'ensemble G_R des couples $(x, y) \in E \times E$ tels que xRy . Ce qu'on exprime par la formule suivante :

$$G_R = \{(x, y) \in E \times E \mid xRy\}.$$

La donnée du graphe d'une relation binaire est équivalente à la donnée de cette relation binaire. Si R est la relation, $x \in E$ et $y \in E$, alors on écrit xRy si x est en relation avec y . Si :

$$E = \{a, b, c\} \text{ et } G_R = \{(a, a), (a, c), (c, b)\},$$

alors une représentation tabulaire associée est la suivante :

E	E
a	a
a	c
c	b

Figure 46 : Représentation tabulaire d'une relation binaire

Une représentation cartésienne associée est la suivante :

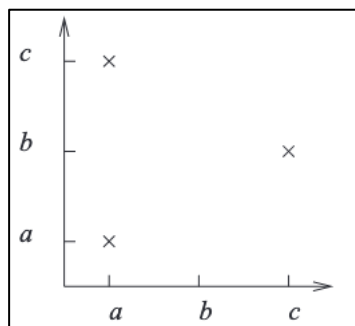


Figure 47 : Représentation cartésienne d'une relation binaire

Un diagramme sagittal associé est le suivant :

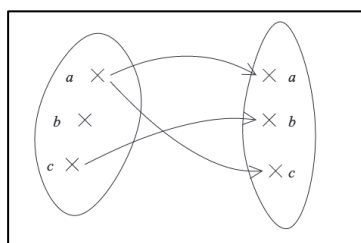


Figure 48 : Diagramme sagittal d'une relation binaire

Enfin une matrice d'incidence associée est la suivante :

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \\
 \end{array}
 \begin{array}{ccc}
 & a & b & c \\
 a & \left(\begin{array}{ccc}
 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0
 \end{array} \right) \\
 b \\
 c
 \end{array}$$

Figure 49 : Matrice d'incidence d'une relation binaire

On sait que E est un ensemble et R une relation binaire sur E . Dès lors on dit que R est une relation d'ordre si R est réflexive, antisymétrique et transitive. Ce qui signifie :

- pour tout x de E : xRx (réflexivité) ;
- pour tous les x et y de E tels que xRy et yRx , alors $x = y$ (antisymétrie) ;
- pour tous les x , y et z de E tels que xRy et yRz , alors xRz (transitivité).

De plus, si R est une relation d'ordre (notée \preceq) sur E et A une partie de E :

- on dit que x est un majorant de A si $\forall y \in A, y \preceq x$;
- on dit que x est un minorant de A si $\forall y \in A, x \preceq y$;
- s'il existe un minorant de A qui appartient à A , on dit que c'est le plus petit élément de A et on le note $\min(A)$;
- s'il existe un majorant de A qui appartient à A , on dit que c'est le plus grand élément de A et on le note $\max(A)$;
- si l'ensemble des minorants de A admet un plus grand élément, on l'appelle borne inférieure de A et on le note $\inf(A)$;
- si l'ensemble des majorants de A admet un plus petit élément, on l'appelle borne supérieure de A et on le note $\sup(A)$.

En exploitant les propriétés de la relation d'ordre \preceq , il est possible de représenter les ensembles ordonnés finis tels que (E, \preceq) au moyen de diagrammes, appelés diagrammes de Hasse. Le diagramme de Hasse de (E, \preceq) est construit ainsi :

- chaque $x \in E$ est représenté par un point p_x ;
- si $x < y$ alors p_x est situé au-dessous de p_y ;
- p_x et p_y sont reliés par une arête si et seulement si $x < y$ et il n'existe aucun z tel que $x < z < y$.

Les conventions interprétatives qui permettent de l'interpréter sont les suivantes :

- les éléments ordonnés sont représentés par des sommets ;
- la relation entre deux éléments est représentée par une arête ;
- pour $\forall x \in E$ et $\forall y \in E$ tels que $x \preceq y$, le sommet du diagramme de Hasse représentant x est placé plus bas que celui représentant y . Comme le sens de la relation d'ordre va du bas vers le haut, l'orientation des arêtes n'a pas besoin d'être fléchée ;
- les relations réflexives et transitives entre éléments ne sont pas représentées.

Le diagramme de Hasse permet ainsi de représenter la relation d'ordre sur un ensemble fini en simplifiant le diagramme sagittal. Avec les conventions énoncées ci-dessus, $x < y$ dans (E, \preceq) si et seulement s'il existe un chemin ascendant de x à y dans son diagramme de Hasse. Voici le diagramme de Hasse d'un certain ensemble ordonné à 9 éléments :

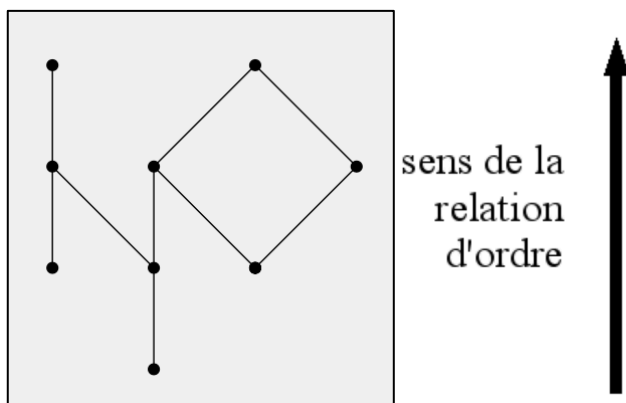


Figure 50 : Diagramme de Hasse d'un ensemble ordonné à 9 éléments¹⁴⁹

Pour l'ensemble E des diviseurs de 60 tel que $E = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60\}$, c'est-à-dire tels que les éléments de E sont ordonnés par la relation de divisibilité sur $(E, |)$ avec $|$ la relation de divisibilité sur E , le diagramme de Hasse est le suivant :

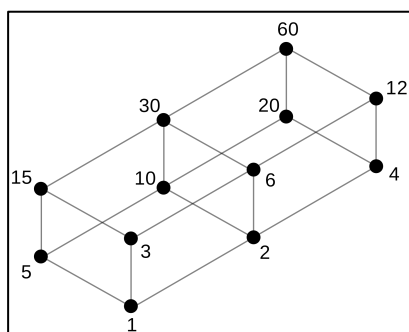


Figure 51 : Diagramme de Hasse de l'ensemble des diviseurs de 60¹⁵⁰

¹⁴⁹https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hasse#/media/Fichier:Diagramme_de_Hasse.png

¹⁵⁰https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Hasse#/media/Fichier:Lattice_of_the_divisibility_of_60.svg

4.2 Figurer des partitions : le diagramme de Ferrers

Soit $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k)$ une suite d'entiers strictement positifs. Le poids de λ est défini par :

$$|\lambda| = \lambda_1 + \dots + \lambda_k$$

Chaque λ_i est une part de λ . Si $|\lambda| = n$, λ est une composition de n . Si λ est une suite décroissante, c'est une partition de n . Par exemple, les partitions de poids 5 sont au nombre de 7 :

$$\begin{aligned} &(5) \\ &(4, 1) \\ &(3, 2) \\ &(3, 1, 1) \\ &(2, 2, 1) \\ &(2, 1, 1, 1) \\ &(1, 1, 1, 1, 1) \end{aligned}$$

À toute partition λ on associe une représentation graphique nommée *diagramme de Ferrers*, où la $j^{\text{ième}}$ ligne contient λ_j cellules et où les lignes sont justifiées à gauche. Si par exemple $\lambda = (8, 8, 6, 4, 2)$, alors le diagramme de Ferrers associé à cette partition est le suivant :

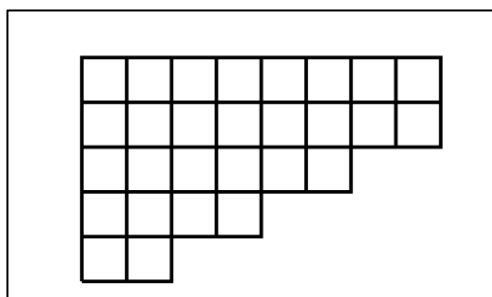


Figure 52 : Diagramme de Ferrers d'une partition

Une *surpartition* est quant à elle une suite décroissante d'entiers dans laquelle « la première occurrence d'un entier peut être surlignée¹⁵¹ ». Par exemple¹⁵², les surpartitions de 5 en 3 parts sont au nombre de 8 :

- (3, 1, 1)
- (3, $\bar{1}$, 1)
- ($\bar{3}$, 1, 1)
- ($\bar{3}$, $\bar{1}$, 1)
- (2, 2, 1)
- (2, 2, $\bar{1}$)
- ($\bar{2}$, 2, 1)
- ($\bar{2}$, 2, $\bar{1}$)

Le diagramme de Ferrers d'une surpartition est celui d'une partition où la dernière cellule d'une ligne peut être colorée, et où les cellules colorées correspondent aux parts surlignées. Le diagramme de Ferrers de la surpartition (7, 6, 5, $\bar{4}$, 3, $\bar{2}$, 1) est ainsi le suivant :

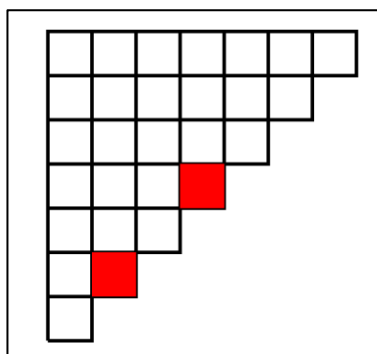


Figure 53 : Diagramme de Ferrers d'une surpartition¹⁵³

¹⁵¹ S. Corteel, *Diagrammes de Ferrers décorés*, mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Diderot 7, 2010, p. 3.

¹⁵² L'exemple est donné dans : S. Corteel, *op. cit.*, p. 3.

¹⁵³ *Ibid.*, Fig. I.3, p. 4.

Les surpartitions peuvent être vues comme des couples d'une partition (composée des parts non surlignées) et d'une partition composée de parts distinctes (les parts surlignées)¹⁵⁴.

L'ensemble complet des diagrammes de Ferrers des partitions d'entiers jusqu'à 8 est donné comme suit :

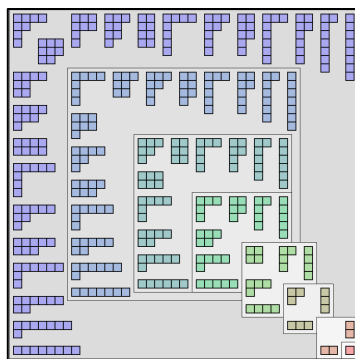


Figure 54 : Ensemble complet des diagrammes de Ferrers des partitions d'entiers jusqu'à 8¹⁵⁵

Si on souhaite associer une somme de huit nombres entiers dont le plus grand est 5 à une somme de cinq nombres entiers dont le plus grand est 8, on peut appliquer une symétrie suivant l'axe de la deuxième bissectrice au diagramme de Ferrers situé à gauche ci-dessous (voir Figure 55) qui représente la somme $5 + 4 + 4 + 3 + 3 + 3 + 2 + 1$: on obtient un second diagramme de même type qui représente la somme $8 + 7 + 6 + 3 + 1$:

¹⁵⁴ S. Corteel, *op. cit.*, p. 4.

¹⁵⁵https://fr.wikipedia.org/wiki/Partition_d%27un_entier#/media/Fichier:Ferrer_partitioning_diagram_s.svg

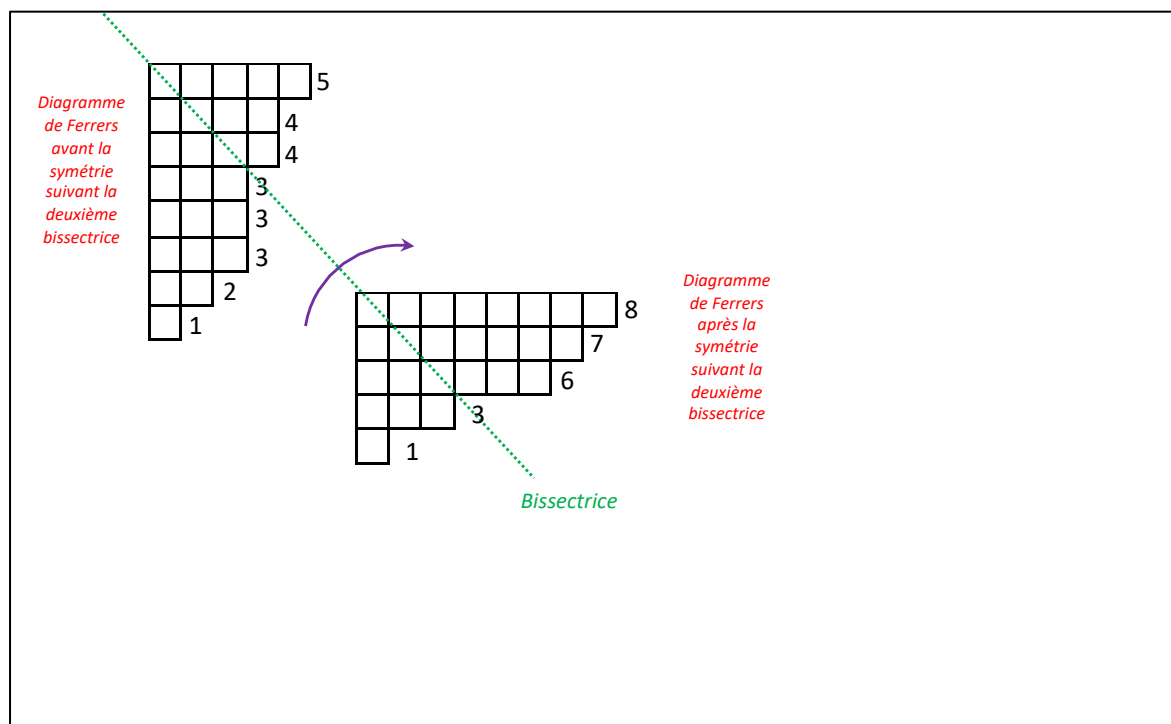


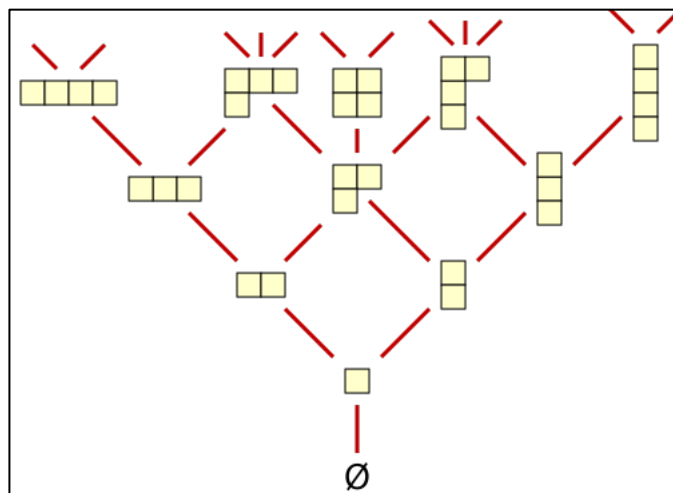
Figure 55 : Symétrie suivant la bissectrice du diagramme de Ferrers d'une somme d'entiers

Le nombre de cellules étant conservé, on a donc l'égalité suivante :

$$1 + 2 + 3 + 3 + 3 + 4 + 4 + 5 = 1 + 3 + 6 + 7 + 8 = 25$$

Les deux diagrammes de Ferrers ci-dessus nous donnent donc bien deux partitions du nombre 25 qui sont dites duales l'une de l'autre.

On peut remarquer que la représentation de l'ensemble partiellement ordonné composé de toutes les partitions d'entiers (qu'on appelle le *treillis d'Young*) est un graphe construit à partir de la combinaison d'un diagramme de Hasse et de diagrammes de Ferrers :

Figure 56 : Treillis d'Young¹⁵⁶

Les diagrammes de Ferrers doivent leur nom au mathématicien Norman Macleod Ferrers, mais ont été introduits en tant que tels pour la première fois dans un article de 1882 de James Joseph Sylvester et Fabian Franklin¹⁵⁷.

4.3 Géométriser des algèbres classifiées : les diagrammes de Coxeter et Dynkin

Les diagrammes de Coxeter sont des représentations graphiques des groupes de Coxeter. Ces groupes sont définis par générateurs et relations de la façon suivante :

$$G = \langle r_1, r_2, \dots, r_n \mid (r_i * r_j)^{m_{ij}} \rangle$$

Cela signifie que les éléments du groupe sont tous les mots que l'on peut former avec les éléments r_1, r_2, \dots, r_n modulo les relations $(r_i * r_j)^{m_{ij}}$. La matrice $M = (m_{ij})$ joue le rôle de matrice de Cartan, ce qui permet de faire le lien avec les diagrammes de Dynkin. $m_{ii} = 1$ (donc les r_i sont des réflexions) et $m_{ij} \geq 2$. On note « ∞ » s'il n'y a pas de relation.

¹⁵⁶ https://fr.wikipedia.org/wiki/Treillis_de_Young#/media/Fichier:Young's_lattice.svg

¹⁵⁷ J. J. Sylvester & F. Franklin, « A Constructive Theory of Partitions, Arranged in Three Acts, an Interact and an Exodion », *American Journal of Mathematics*, vol. 5, n° 1, Johns Hopkins University Press, 1882, p. 251-330.

Chaque sommet d'un diagramme de Coxeter représente une réflexion r_i et les arêtes représentent les relations m_{ij} double, triple, selon la valeur de m_{ij} .

Le tableau suivant (Figure 57) représente les groupes de Coxeter dans le plan euclidien. La première ligne du tableau se réfère aux différents groupes en tant que tels : chaque cellule indique à gauche le symbole du groupe considéré (R_3 , $W_2 \times W_2$, V_3 et P_3) et à droite sa structure ((\tilde{B}_2) , $(\tilde{I}_2 \times \tilde{I}_2)$, (\tilde{H}_2) , (\tilde{A}_2)). La deuxième ligne se réfère au groupe considéré en notation avec des crochets (*bracket notation*) et au diagramme de Coxeter qui lui est associé. La troisième ligne présente le domaine fondamental de chaque groupe étudié. La quatrième ligne présente le diagramme de Coxeter associé à chaque domaine fondamental :

R_3	(\tilde{B}_2)	$W_2 \times W_2$ ($\tilde{I}_2 \times \tilde{I}_2$)	V_3	(\tilde{H}_2)	P_3	(\tilde{A}_2)
[4,4]		$[\infty] \times [\infty]$	[6,3]		$[\Delta]$	

Figure 57 : Tableau des groupes de Coxeter dans le plan euclidien et de leurs diagrammes équivalents¹⁵⁸

Les diagrammes de Coxeter et Dynkin doivent leur nom au mathématicien britannique Harold Scott MacDonald Coxeter, qui les a véritablement introduits en 1940¹⁵⁹. Evgenii B. Dynkin les a réinventés en 1946 pour la classification des algèbres de

¹⁵⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Coxeter-Dynkin#/media/Fichier:Coxeter-2-spaco.png

¹⁵⁹ H. S. M. Coxeter, « Regular and semi-regular polytopes. I », *Mathematische Zeitschrift*, vol. 46, n° 1, 1940, p. 380-407.

Lie semi-simples¹⁶⁰, où ils sont utilisés dans le but suivant : 1° représenter les algèbres de Lie semi-simples, auxquelles correspondent des systèmes de racines ; 2° associer à chaque système de racines un diagramme unique¹⁶¹.

Un diagramme de Dynkin se compose d'une part de sommets $\{1, 2, \dots, r\}$ qui tiennent lieu des racines $\{\alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(r)}\}$ de l'algèbre qu'il s'agit de représenter ; d'autre part d'arêtes qui relient les sommets entre eux et représentent graphiquement les valeurs des éléments symétriques de la matrice de Cartan (qui sont engendrés en faisant le produit scalaire de la racine $\alpha^{(i)}$ par sa racine duale $\alpha^{(j)\vee}$). Or la matrice de Cartan est définie ainsi : « les éléments diagonaux valent 2 ($A_{ii} = 2$) et les éléments en dehors de la diagonale se calculent par le produit scalaire $A_{ij} = (\alpha^{(i)}, \alpha^{(j)\vee}$). La racine duale de la racine α est le vecteur $\alpha^\vee = 2\alpha / (\alpha, \alpha)$ ¹⁶² ».

Si les éléments symétriques sont nuls ($A_{ij} = A_{ji} = 0$), alors les sommets du diagramme ne sont pas reliés entre eux par une arête. Si les éléments symétriques valent -1 ($A_{ij} = A_{ji} = -1, j \neq i$), alors les sommets sont reliés entre eux par une arête simple. Si $A_{ij} = -2$ et $A_{ji} = -1$, avec $j \neq i$, les sommets sont reliés par une arête double. Si $A_{ij} = -3$ et $A_{ji} = -1$, avec $j \neq i$, ils le sont par une arête triple. De cette façon, « la classification des algèbres de Lie semi-simples est donnée sous une forme diagrammatique¹⁶³ ». Par exemple, la recherche du diagramme de l'algèbre A_2 , qui est l'algèbre $sl(2)$ associée au groupe SL_2 , conduit à l'expression suivante de la matrice de Cartan :

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

¹⁶⁰ E. B. Dynkin, « Classification of the simple Lie groups », *Matematicheskii Sbornik.*, vol. 18, n° 2, 1946, p. 347–352.

¹⁶¹ M. Lefebvre, « Construction et déconstruction des diagrammes de Dynkin », *Actes de la recherche en sciences sociales*, vol. 141-142, n° 1-2, 2002, p. 121-122.

¹⁶² F. Jędrzejewski, *Diagrammes et catégories*, Thèse de doctorat en philosophie, Université Paris-Diderot – Paris VII, 2007, p. 37.

¹⁶³ *Ibid.*, p. 38.

Celle-ci permet de construire le diagramme de Dynkin de l'algèbre A_2 qui lui est associé :

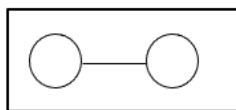


Figure 58 : Diagramme de Dynkin de l'algèbre A_2

Si on généralise cette construction à une matrice de rang quelconque, on obtient le diagramme de Dynkin suivant exprimant l'algèbre A_n :

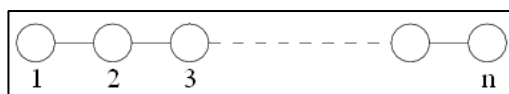


Figure 59 : Diagramme de Dynkin de l'algèbre A_n ¹⁶⁴

¹⁶⁴https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_de_racines#/media/Fichier:Dynkin_diagram_An.PNG
G

BILAN DU CHAPITRE 4

Ce chapitre nous a permis de distinguer deux premières classes de pseudo-diagrammes : les représentations graphiques de données et les cartogrammes. La première classe permet de sémiotiser des ensembles de données en jouant sur les couleurs et les formes géométriques élémentaires (rectangles ou courbes dans les cas étudiés). Lorsqu'on supplémente ces représentations graphiques d'illustrations, que ce soit des pictogrammes ou des figurines, on obtient des cartogrammes, représentations graphiques qui commencent un peu à fonctionner, comme en témoigne le diagramme Isotype de la planche 74 de la Figure 45. Outre les pseudo-diagrammes, nous avons pu identifier ce que nous appelons des quasi-diagrammes (diagramme de Hasse, diagramme de Ferrers, diagrammes de Coxeter et Dynkin), qui correspondent à des systèmes de notation permettant d'opérer des changements de représentation pour reconnaître des objets abstraits, les classer et les ordonner à travers des schémas notationnels. Les quasi-diagrammes ne sont pas encore des diagrammes, car ce ne sont pas des machines sémiotiques, comme celles que nous allons étudier dans les chapitres 5 et 6.

PLAN DU CHAPITRE 5

L'objectif de ce chapitre est de présenter une typologie morphologique des diagrammes. Nous proposons de distinguer quatre grands types morphologiques : le diagramme ternaire, le diagramme thermodynamique, le diagramme d'espace-temps et le système de notation du geste. Nous analysons successivement les cas suivants :

- les différents usages du diagramme ternaire : en bijouterie, géologie, géographie et génétique des populations ;
- deux diagrammes de phases en science des matériaux : le diagramme de phases de l'alliage cuivre-nickel et le diagramme d'Ellingham ;
- deux diagrammes d'espace-temps : le diagramme de Minkowski en théorie de la relativité restreinte et le diagramme de Penrose-Carter en théorie de la relativité générale ;
- deux systèmes de notation du geste : les principes de la cinétographie Laban et le mode d'emploi d'un autocuiseur.

CHAPITRE 5. TYPOLOGIE MORPHOLOGIQUE DES DIAGRAMMES

1. Les diagrammes ternaires

1.1 Les divers usages d'un diagramme ternaire

Un diagramme ternaire est une représentation graphique en deux dimensions qui permet de représenter trois variables exclusives, c'est-à-dire dont la somme fait 100%. Il est souvent représenté au moyen d'un triangle équilatéral, mais pas nécessairement. Tout point situé à l'intérieur du triangle est pondéré par un ensemble de trois valeurs. On l'utilise dans des domaines aussi différents que la bijouterie, la géologie, l'agronomie, la pédologie ou encore la géographie.

On l'utilise en bijouterie, car les bijoux ne sont jamais composés exclusivement d'or : ils comportent aussi de l'argent et du cuivre. En fonction des proportions d'or, d'argent ou de cuivre, on confèrera au bijou travaillé une teinte variable, soit cuivrée, jaune ou blanche, comme le montre la Figure 60 :

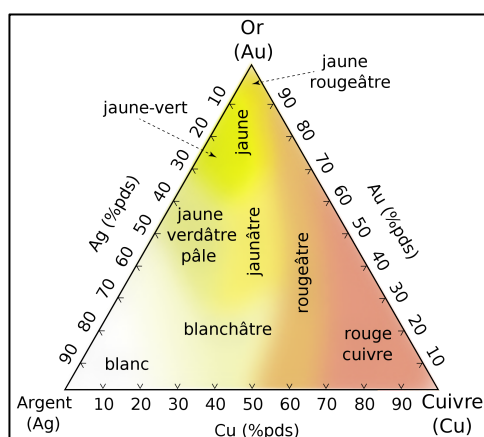


Figure 60 : Diagramme ternaire Or-Argent-Cuivre¹⁶⁵

On utilise aussi le diagramme ternaire en agronomie et en pédologie pour étudier la composition granulométrique des sols et déterminer des classes de textures. En fonction de la proportion de sable, d'argile et de limon, il permet de dire si la texture d'un terrain

¹⁶⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_ternaire#/media/Fichier:Ag-Au-Cu-couleurs-fr.svg

est plutôt sableuse, limoneuse, limono-argileuse, etc., comme le montre le diagramme de la Figure 61 :

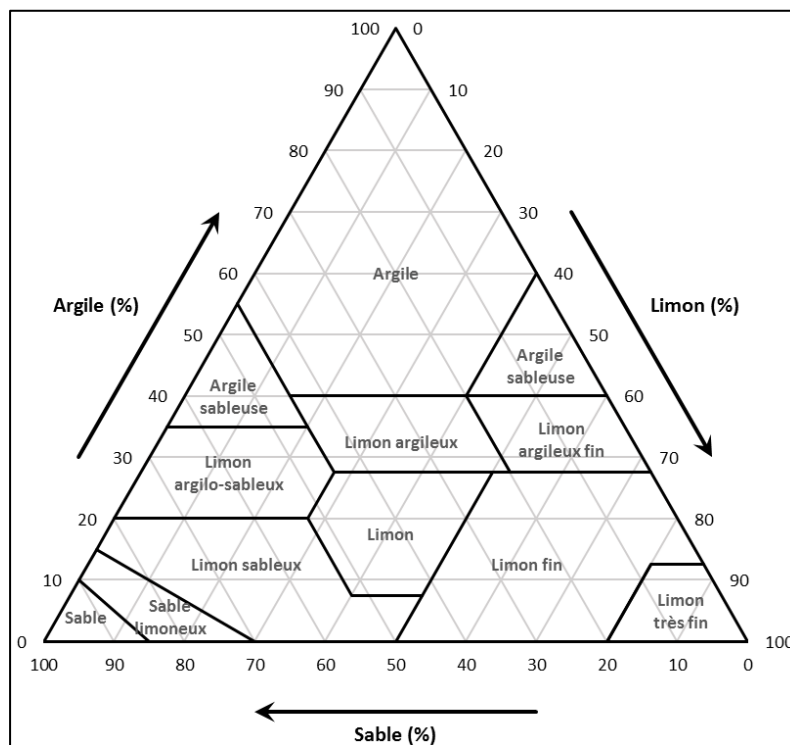


Figure 61 : Diagramme ternaire Argile-Limon-Sable¹⁶⁶

La géologie fait aussi un usage du diagramme ternaire pour classer des roches afin de les regrouper en familles¹⁶⁷. Chaque sommet du diagramme représente alors un des trois constituants *A*, *B* et *C*, et chaque côté du triangle, un mélange binaire comprenant une composition d'éléments pris deux à deux. Un mélange ternaire est ainsi représenté par un point situé à l'intérieur du triangle, comme le point rouge de la Figure 62. La proportion de chaque élément se trouve à l'intersection de chaque côté en traçant leur parallèle respective à partir d'un point choisi à l'intérieur du triangle :

¹⁶⁶https://fr.wikipedia.org/wiki/Texture_du_sol#/media/Fichier:Triangle-texture-sols.png

¹⁶⁷ Voir l'entrée « Diagramme de Streckeisen » de l'annexe 1.

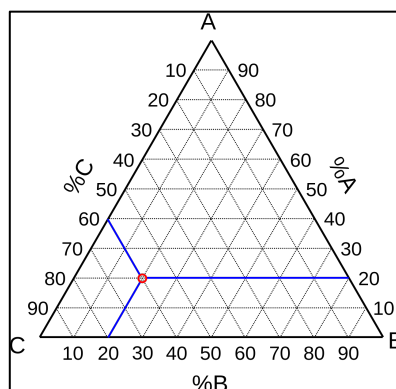


Figure 62 : Diagramme ternaire généralisé¹⁶⁸

La géographie, enfin, utilise le diagramme ternaire pour étudier l'emplacement de certains pays dans un espace graphique. On peut par exemple étudier le développement d'un pays en fonction de son activité agricole, industrielle et économique. En fonction de ces trois variables, on peut placer les pays dans l'espace graphique du diagramme et identifier leur potentiel agricole, industriel ou économique.

Le diagramme se construit de la façon suivante : on représente toujours les variables dans l'ordre *A*, *B* et *C*. Si on prend l'exemple de deux observations fictives notées 1 et 2 caractérisées par trois variables, leur somme doit toujours faire 100%. Le tableau des valeurs relatives de ces variables pour ces observations est celui de la Figure 63 :

Variables (%)				
	A	B	C	
1	30	20	50	$\Sigma=100\%$
2	60	10	30	$\Sigma=100\%$

* Σ : Somme

Figure 63 : Tableau des valeurs relatives de trois variables géographiques¹⁶⁹

¹⁶⁸https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_ternaire#/media/Fichier:Lecture_diagramme_ternaire.svg

¹⁶⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=gglnPf1zMjg>

On reporte les données du tableau dans le diagramme ternaire, dont le sens de lecture est donné par la Figure 64. La variable A se lit dans la diagonale montante vers la droite, la variable B sur la droite horizontale de la droite vers la gauche et la variable C , dans la diagonale descendante vers la droite :

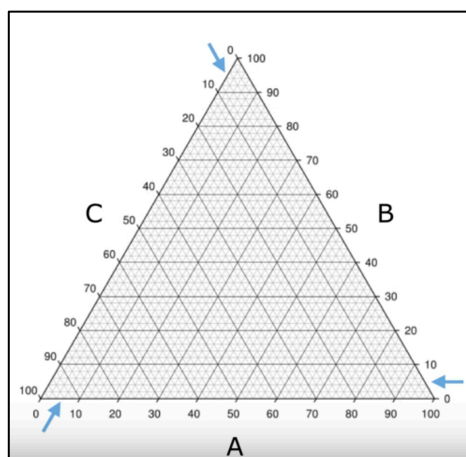


Figure 64 : Sens de lecture du diagramme ternaire à trois variables¹⁷⁰

Dès qu'on positionne la valeur de deux variables, on en déduit la valeur de la troisième en raison de la règle des 100%. Dans le cas de l'observation 1, il s'agit pour les variables A , B et C des valeurs relatives 30%, 20% et 50 %, dont la somme fait bien 100%. Dans le cas de l'observation 2, il s'agit pour les variables A , B et C des valeurs relatives 60%, 10% et 30 %, dont la somme fait bien 100% :

¹⁷⁰ <https://www.youtube.com/watch?v=gglPF1zMjg>

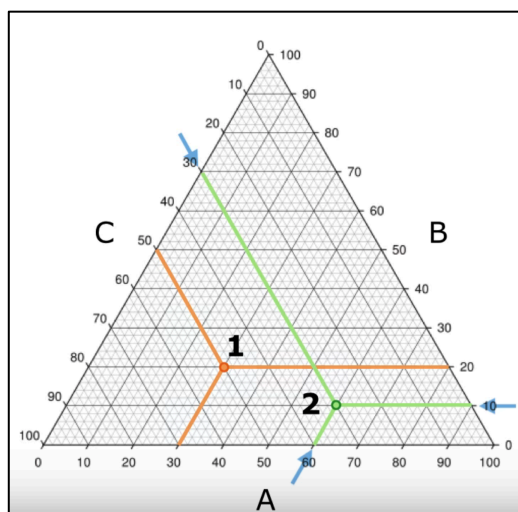


Figure 65 : Positionnement des observations fictives sur un diagramme ternaire¹⁷¹

Si on travaille sur les secteurs d'activités géographiques (primaire, secondaire et tertiaire), alors on convient que 1 et 2 représentent des pays. Si tel est le cas, alors 1 représentera un pays développé et 2 un pays en voie de développement avec un fort potentiel agricole, car 60% de l'économie tourne autour de l'agriculture, 10% autour des industries et 30% autour du secteur tertiaire. Le diagramme de la Figure 66 permet ainsi d'observer que les pays suivent la trajectoire d'une flèche dont l'origine se situe dans le coin inférieur droit. La trajectoire de cette flèche matérialise alors une dynamique de développement, celle de la montée des pays dans le secteur secondaire suivie de leur descente vers le secteur tertiaire :

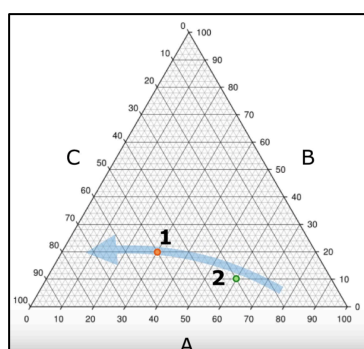


Figure 66 : Sémiotisation d'une dynamique de développement sur un diagramme ternaire

¹⁷¹ <https://www.youtube.com/watch?v=gglpPF1zMjg>

1.2 Exploiter un théorème de géométrie pour exprimer une loi statistique : le diagramme de De Finetti

Bruno De Finetti, un statisticien italien, a utilisé le diagramme ternaire pendant ses études d'ingénieur à l'École polytechnique de Milan, et l'a présenté pour la première fois au §26 de son premier article paru en 1926 dans la revue *METRON* (voir Figure 67), pour comparer la fréquence de trois génotypes dans la population qu'il étudiait :

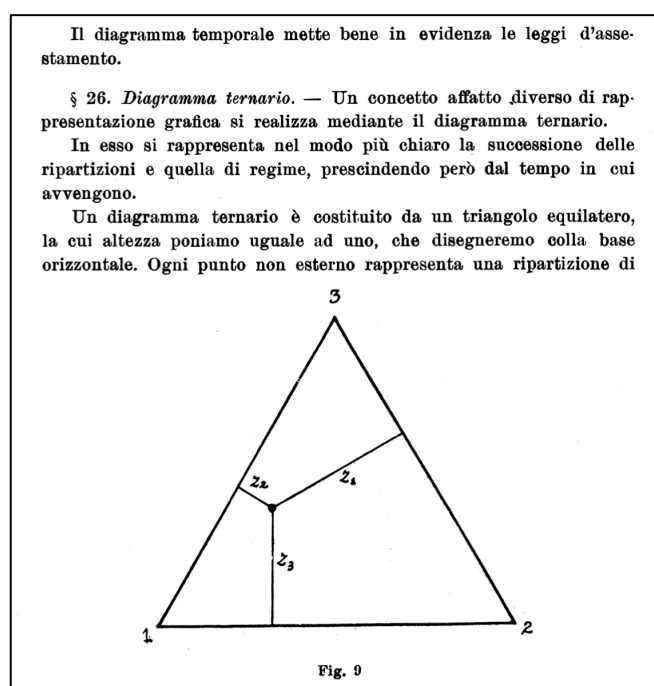


Figure 67 : Premier diagramme de De Finetti dans son premier article de 1926 publié dans la revue *METRON*¹⁷²

Un organisme est dit *diploïde* lorsque les cellules qui le composent contiennent des chromosomes présents par paires. En génétique, un *locus* désigne un point précis d'un chromosome où est situé un gène. Enfin un *allèle* est un gène de même niveau qu'un autre sur les chromosomes d'une même paire. Les allèles d'une paire de chromosomes

¹⁷² B. de Finetti, « Considerazioni matematiche sull'ereditarietà mendeliana », *METRON*, 1926, n° 1, Figure 9.

homologues peuvent être identiques et on parle alors d'*homozygotie*. S'ils sont différents, on parle d'*hétérozygotie*.

L'usage du diagramme de De Finetti est fondé sur le théorème de Viviani, selon lequel dans un triangle équilatéral, la somme des distances d'un point intérieur au triangle aux trois côtés est égale à la hauteur du triangle. Par conséquent, trois nombres p , q et r tels que $p + q + r = 1$ peuvent être représentés par les trois distances d'un point intérieur à chacun des côtés de ce triangle équilatéral :

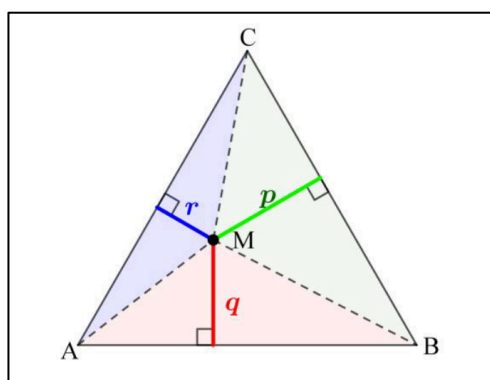


Figure 68 : Fondement géométrique du théorème de Viviani¹⁷³

Comme le nombre de génotypes possibles pour un locus à deux allèles (a , A) est trois (aa , aA , AA), le diagramme de De Finetti, grâce au théorème de Viviani, permet de représenter les probabilités possibles pour les trois génotypes. Si on souhaite visualiser toutes les compositions génétiques d'une population pour un locus à deux allèles (a , A) dans un organisme diploïde, on peut construire le diagramme de De Finetti suivant :

¹⁷³https://cache.media.eduscol.education.fr/file/les_mathematiques_de_1_ES/82/3/RA20_Lyce_G_T_ES_sous-theme-3-1-Hardy-Weinberg_1241823.pdf

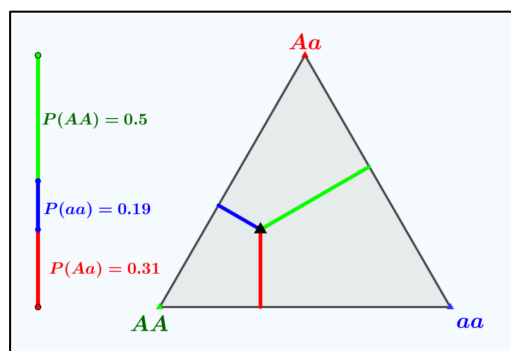


Figure 69 : Expression colorimétrique du théorème de Viviani¹⁷⁴

Les sommets du triangle représentent des états où toute la population étudiée a le même génotype : soit Aa , soit AA , soit aa . Les états sur les côtés du triangle n'ont que deux génotypes. Sur le segment $[aa Aa]$ la population est seulement composée des génotypes aa et Aa . Le même principe est appliqué aux deux autres segments $[Aa AA]$ et $[AA aa]$. Les projections orthogonales du point M (point noir des Figures 68 et 69) permettent d'obtenir les fréquences de chaque génotype. Si on fait varier la fréquence du génotype AA notée $P(AA)$ en modulant les valeurs de fréquence avec le curseur vert de la Figure 69, on remarque que les fréquences des génotypes aa et Aa respectivement notées $P(aa)$ et $P(Aa)$, en raison du théorème de Viviani, se déduisent par projections orthogonales sur les côtés $[Aa AA]$ et $[AA aa]$ du triangle, et que la somme des trois fréquences génotypiques est toujours égale à 1.

On considère toujours un locus à deux allèles (A , a). D'après le principe de Hardy-Weinberg, si les fréquences des allèles A et a sont telles que $P(A) = p$ et $P(a) = q$, alors on sait que les fréquences respectives $P(AA)$ et $P(aa)$ des génotypes AA et aa attendues dans des conditions d'accouplement aléatoire sont telles que :

$$P(AA) = p^2 ; P(aa) = q^2 ; P(Aa) = 2pq.$$

¹⁷⁴https://cache.media.eduscol.education.fr/file/les_mathematiques_de_1_ES/82/3/RA20_Lyce_G_T_ES_sous-theme-3-1-Hardy-Weinberg_1241823.pdf

En l'absence d'action de forces évolutives (comme la sélection, la mutation, la dérive génétique, etc.), les fréquences alléliques sont constantes entre les générations car à la génération suivante, on a alors :

$$P(A) = P(AA) + \frac{1}{2} P(Aa) = p^2 + \frac{1}{2} \times 2pq = p^2 + p(1-p) = p.$$

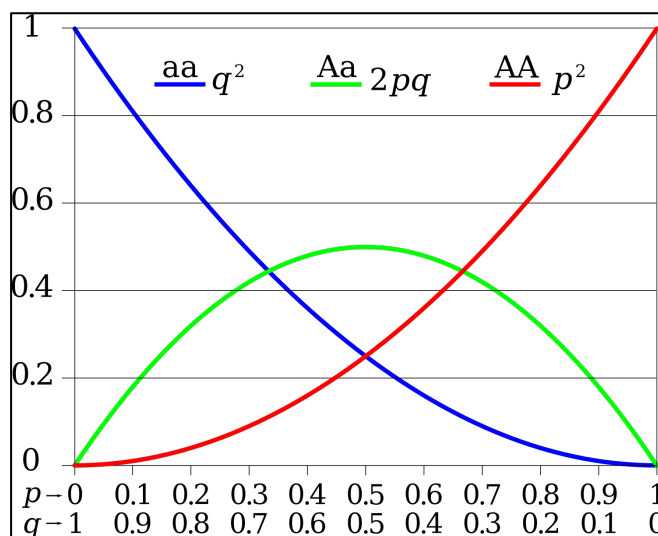


Figure 70 : Proportions de Hardy-Weinberg pour deux allèles¹⁷⁵

L'interprétation des courbes de la Figure 70 montre deux choses :

- 1° que la fréquence maximale des hétérozygotes (génotype Aa) est atteinte lorsque la fréquence x de l'allèle A vaut $\frac{1}{2}$;
- 2° que la courbe rouge est située sous la courbe verte pour de petites valeurs de x . Cela signifie que lorsqu'un des allèles est rare (par exemple un allèle récessif responsable d'une maladie rare), la majorité des individus qui en sont porteurs est hétérozygote (donc non atteinte par la maladie).

On peut inscrire le diagramme de De Finetti ainsi que la parabole d'équilibre de Hardy-Weinberg dans un repère orthonormé de la façon suivante :

¹⁷⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Hardy%E2%80%93Weinberg_principle#/media/File:Hardy-Weinberg.svg

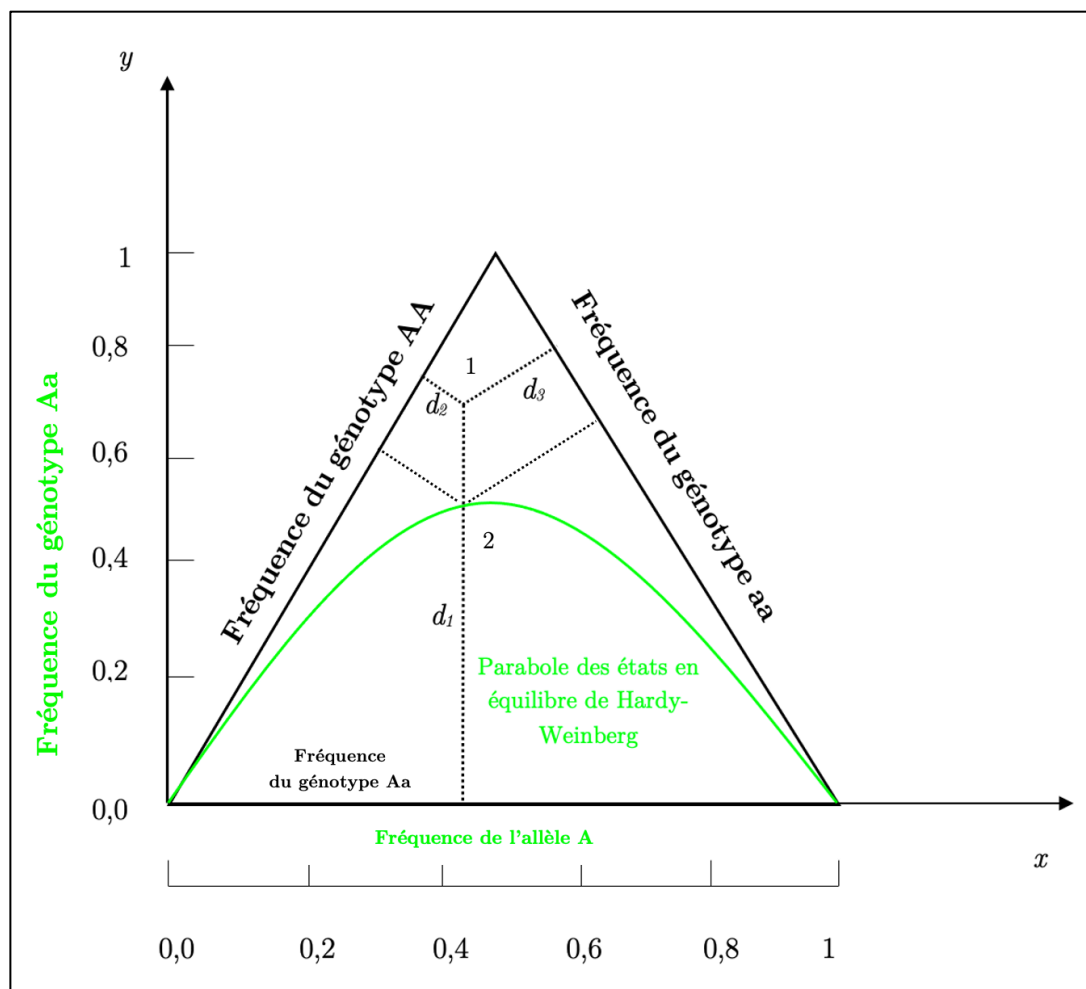


Figure 71 : Superposition du diagramme de De Finetti avec la parabole des états en équilibre de Hardy-Weinberg

Sur la Figure 71 :

- les fréquences du génotype Aa et de l'allèle A sont simultanément exprimées sur l'axe des x en raison de la superposition du diagramme et de la parabole ;
- chaque point à l'intérieur du triangle représente une population possible ;
- les droites perpendiculaires à un point telles que d_1 , d_2 et d_3 représentent les fréquences des trois génotypes d'une population. Elles sont telles que $d_1 = P(Aa)$, $d_2 = P(AA)$ et $d_3 = P(aa)$;
- la superposition permet de remarquer que la population 1 n'est pas en équilibre de Hardy-Weinberg alors que la population 2 l'est car toutes les populations situées sur la parabole sont dans un tel équilibre.

2. Les diagrammes thermodynamiques

2.1 Diagrammes de phases et sciences des matériaux¹⁷⁶

L'alliage de différents atomes métalliques a pour objectif d'améliorer les propriétés initiales physique, chimique ou mécanique des éléments alliés, mais aussi celles de mise en forme du matériau constitué par le mélange obtenu. Par exemple le Fer (Fe) n'est pas un matériau qui est dur à l'état pur. On peut donc l'allier en lui ajoutant du carbone (C) pour former un acier. L'acier forme un alliage Fer-Carbone (Fe-C). Si on ajoute un ou plusieurs autres éléments, on obtient ce qu'on appelle un acier allié, suivant les propriétés d'usage ou de mise en forme souhaitées du mélange constitué.

Les alliages sont donc des impuretés intentionnelles mises au sein de métaux purs initiaux pour transformer leurs propriétés. L'alliage Fe-C est un alliage binaire, car constitué de deux éléments. On peut aussi avoir des alliages à base de cuivre : l'alliage de cuivre et de zinc permet par exemple de former la famille des laitons.

Si on cherche à conférer des propriétés accrues aux matériaux à travers des alliages, c'est souvent pour changer les propriétés d'usage ou de fabrication des éléments alliés. Par exemple, si l'on prend une pépite d'or pur (Au), on a affaire à un élément cubique alpha-centré, car l'or est un élément qui cristallise selon une maille cubique à faces centrées :

¹⁷⁶ Nos analyses sur les diagrammes de phases sont basées sur les cours de la chaîne Youtube SdM GMP (La Science des Matériaux pour le Génie Mécanique et Productique).

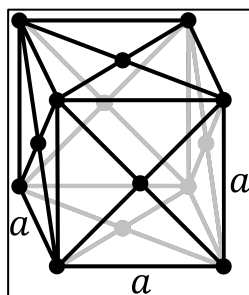


Figure 72 : Représentation d'une maille cubique à faces centrées d'arête a ¹⁷⁷

L'or est à l'état pur un matériau très mou, donc très malléable. Par conséquent, si on souhaite faire un bijou avec de l'or pur, on est confronté à un problème, car si on porte une pépite d'or pur, au moindre contact et au moindre choc, celle-ci va se déformer. Pour fabriquer une médaille, une chaîne ou une bague, un joaillier devra donc travailler sur de l'or durci non seulement pour pouvoir le ciseler lors du processus de fabrication du bijou (propriété de fabrication) mais aussi pour que la forme de l'objet ouvragé soit conservée durant toute la durée de vie de son portage par un client (propriété d'usage).

Autrement dit, les matériaux utilisés dans l'industrie sont rarement des corps purs ou des mélanges parfaitement homogènes. On a donc besoin de définir des structures nécessaires au comportement souhaité d'un alliage, et de connaître la composition et la répartition des phases associées pour pouvoir prédéterminer les structures souhaitées. Pour cela, on a besoin de définir ce qu'on appelle des *phases* pour savoir quelle quantité de phase il va falloir utiliser avec telle autre quantité de phase. L'étude de ces phases passe par l'utilisation d'un outil graphique nommé *diagramme de phases*.

Un diagramme de phases est un diagramme d'équilibre dans lequel on regarde les domaines de stabilité des phases en fonction de trois paramètres : la composition (les éléments alliés), la température (premier facteur physique) et la pression (deuxième facteur physique). Les diagrammes sur lesquels nous travaillerons sont obtenus à partir

¹⁷⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Cubique_%C3%A0_faces_centr%C3%A9es#/media/Fichier:Cubic-face-centered.svg

de courbes de refroidissement lent car ce sont des diagrammes d'équilibre. Comme nous raisonnerons sur des métaux, nos diagrammes seront binaires, ce qui signifie que la composition étudiée sera double. En fixant la pression, seul le paramètre température variera. Par conséquent, la variance, c'est-à-dire le nombre de variables dans le système étudié, dépendra d'une composition double et du paramètre température. Il y aura donc jusqu'à trois phases possibles au niveau du diagramme étudié.

On appelle *miscibilité* la capacité des atomes métalliques à se mélanger. Cette miscibilité peut être totale, auquel cas elle obéit aux règles suivantes : 1° les deux rayons atomiques de chaque élément de l'alliage doivent être très proches, c'est-à-dire ne pas diverger de plus de 15%. C'est une condition nécessaire pour que les atomes du mélange puissent se substituer les uns aux autres ; 2° les deux éléments mélangés doivent avoir la même structure cristalline, car dans le cadre de la miscibilité totale, le premier atome qu'on va utiliser, par exemple celui d'un métal pur (le solvant ou métal A), sera mélangé avec quelques atomes de l'autre élément du mélange (le soluté ou métal B). Cela donnera une unique phase. 3° Il faut que les valences atomiques des éléments de la composition, c'est-à-dire le nombre d'électrons qui peuvent interagir pour créer des liaisons entre atomes en présence, soient identiques. 4° Il faut que le niveau d'électronégativité des atomes en jeu soit équivalent. La miscibilité totale pour les métaux est un cas rare. Le cas général est la miscibilité partielle.

Pour établir un diagramme de phases, on a besoin de courbes de refroidissement obtenues en utilisant un thermocouple¹⁷⁸ que l'on introduit au sein d'un même corps pur, par exemple du Cuivre (Cu), lui-même plongé au sein d'un mélange, par exemple un mélange de Cuivre et de Nickel (Ni). L'expérience consiste à suivre l'évolution de la température de l'état liquide à l'état solide jusqu'à la température ambiante. Cela a pour effet de faire apparaître différents segments de courbes avec des paliers, c'est-à-dire des

¹⁷⁸ Montage qui mobilise un couple de matériaux et exploite l'effet Seebeck pour la mesure de la température.

ruptures de pentes, qui permettent d'indiquer les changements de phases. Prenons l'exemple de la solidification d'un corps pur comme le Nickel (Ni) :

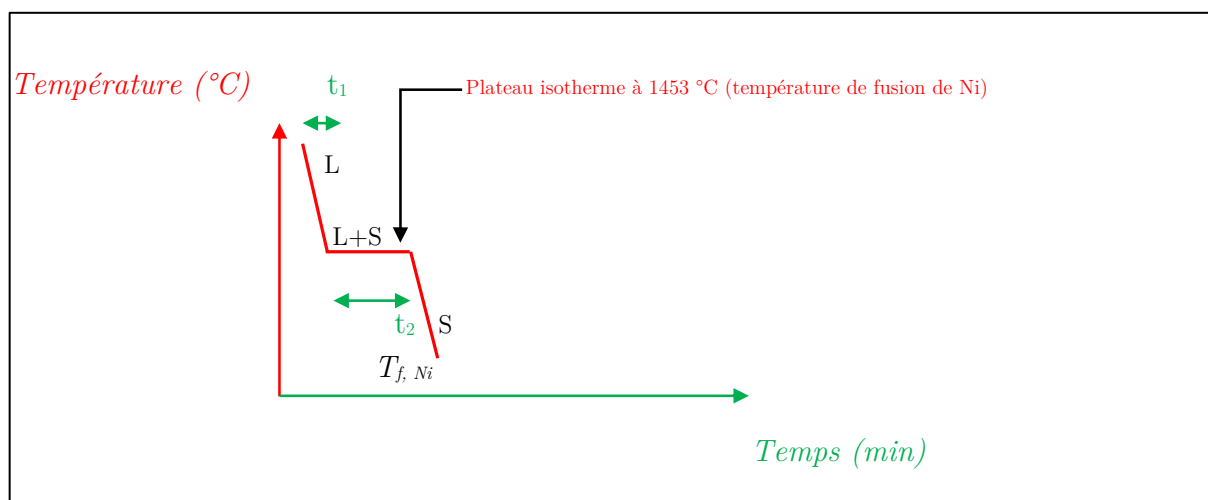


Figure 73 : Graphique de solidification du Nickel

La signification du plateau est qu'après un abaissement de température durant un intervalle de temps t_1 , au moment où on arrive à la température de fusion de Ni, soit 1453 °C, il se crée une transformation de Ni de l'état liquide à l'état solide, et cela graduellement pendant un temps t_2 . La première pente du graphique de température du Nickel correspond donc à la phase de son état liquide (L). Le plateau isotherme correspond à la phase de transition de l'état liquide à l'état solide avec coexistence des deux états (L+S). Enfin la seconde pente correspond à la phase solide (S) dans laquelle il n'y a plus de présence de l'état liquide du corps étudié. $T_{f, Ni}$ désignant la courbe de solidification du Nickel, graphiquement on a donc :

$$T_{f, Ni} = L + (L+S) + S,$$

dès lors que la somme des groupes de lettres et de symboles d'opérations « L », « L+S » et « S » désigne la somme des *segments* de la courbe d'évolution du processus de solidification représenté par le graphique de la Figure 73. Le graphique de solidification du Cuivre est quant à lui le suivant (Figure 74) :

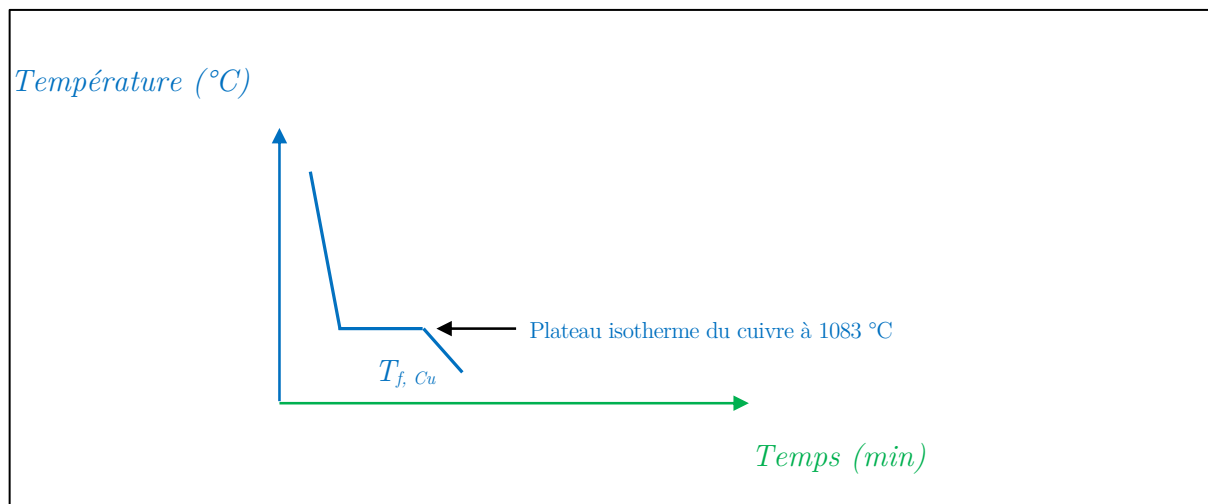


Figure 74 : Graphique de solidification du Cuivre

Si maintenant on prend 50% de masse de Ni et 50% de masse de Cu, qu'on mélange ces deux éléments à l'état liquide et qu'on opère de nouveau un suivi thermique au moyen d'un thermocouple, alors la courbe de solidification du mélange ne va plus avoir le même comportement, notamment durant l'étape de transition liquide plus solide (L+S). Le graphique de solidification de l'alliage binaire Cu-Ni dans des proportions de masses de 50% est alors le suivant :

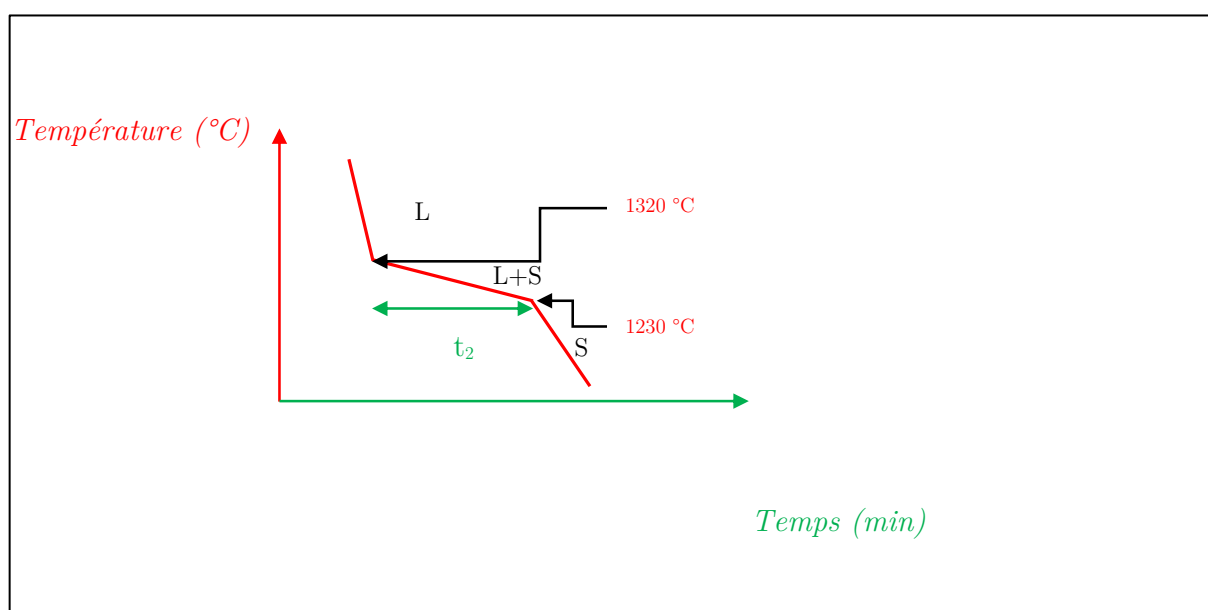


Figure 75 : Graphique de solidification de l'alliage binaire Cu-Ni

À l'étape t_2 on observe une chute linéaire, et non plus un plateau isotherme : la transition liquide/solide L+S n'étant plus constante au cours du temps, elle n'est donc plus isotherme. Dans ce cas, elle est linéaire et décroissante durant l'intervalle de temps t_2 .

Comme nous avons affaire à deux éléments, le Nickel et le Cuivre, nous allons construire un diagramme binaire. Sur le premier axe horizontal à la base du diagramme, on représente la proportion de Cuivre dans le mélange, de gauche à droite, en exprimant son pourcentage massique par rapport au Nickel. On le note $W_{\%} \text{ Cu}$: il varie donc le long de cet axe gradué entre 0 et 100%. Comme nous travaillons avec un seul paramètre physique, la température, qui est exprimée en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$), on représente la variation de ce paramètre suivant l'axe vertical du diagramme. Le diagramme représente donc une coupe à pression constante, car si on avait ajouté l'axe de variation du second paramètre physique, en l'occurrence la pression, on aurait obtenu un diagramme en trois dimensions, plus complexe. Notre diagramme est donc la représentation d'une coupe d'un tel diagramme 3D, car il est à deux dimensions.

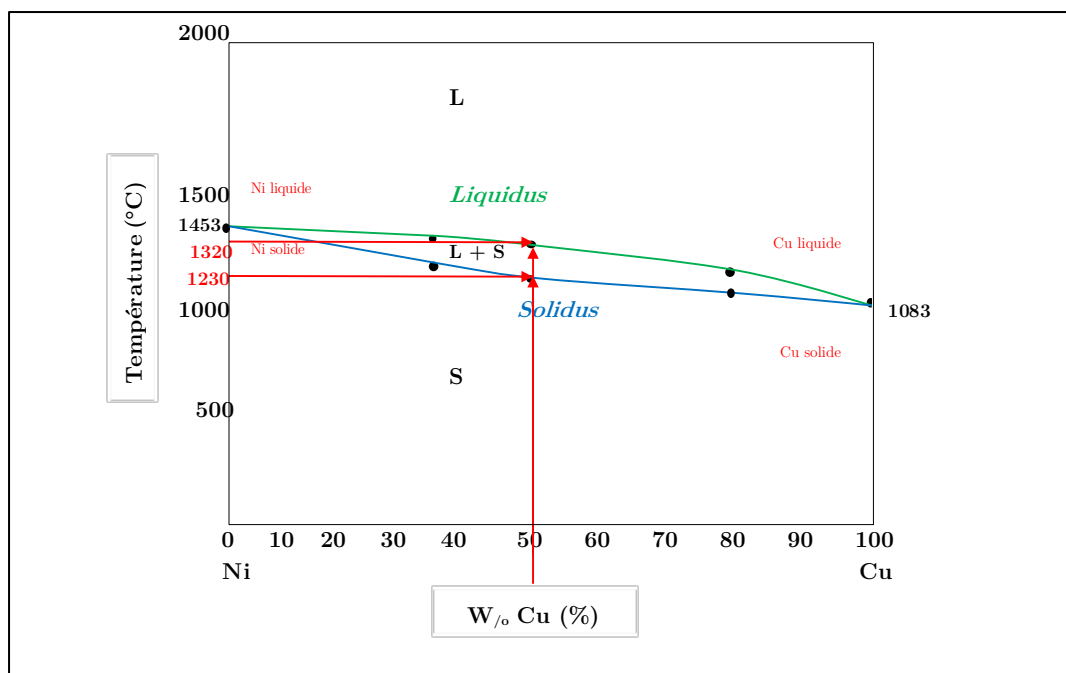


Figure 76 : Diagramme de phases de l'alliage binaire Cu-Ni

D'après ce que nous avons posé précédemment, nous savons que nous avons deux points de température de fusion pour Ni et Cu, le premier à 1453 °C pour 100% de Ni, le second à 1083 °C pour 100% de Cu. Comme notre axe horizontal exprime le pourcentage massique de Cu par rapport à Ni, le point de fusion d'une solution comportant 100% de Ni doit donc être placé sur l'axe vertical de gauche de notre diagramme, c'est-à-dire celui où le pourcentage massique de Cu est de 0%. Le point de fusion à 1453 °C est donc placé sur l'axe vertical de gauche ; celui à 1083 °C sur l'axe vertical de droite. Enfin pour une solution à 50% en masse de Ni et 50% en masse de Cu, nous savons que nous avons deux points de transition thermique à 1320 °C et 1230 °C. Nous pouvons donc trouver ces points par recoupement grâce aux axes du diagramme. Nous pouvons ensuite retrouver les zones Liquide (L), Liquide et Solide (L+S) et Solide (S) du graphique de solidification de l'alliage binaire Cu-Ni : au-dessus de 1320 °C la solution est dans un état liquide, entre 1320 °C et 1230 °C elle est dans un état de transition de l'état liquide vers l'état solide et enfin en-dessous de 1230 °C, la solution est dans un état solide.

Si maintenant on détermine d'autres points correspondant à d'autres pourcentages de cuivre, par exemple 35% et 80%, on obtient alors différents points de transition entre les différentes phases L, L+S et S. On peut dès lors tracer les lignes de raccordement entre points de même transition. On obtient une première ligne de saturation qu'on appelle le *liquidus* : on peut parler de saturation car le diagramme montre que lorsqu'on refroidit le liquide à n'importe quel endroit de cette ligne, on va voir apparaître une phase L+S. On obtient de la même façon une seconde ligne de démarcation qu'on appelle le *solidus*, qui relie les points de transition entre la partie du diagramme du domaine L+S et celle du domaine S. On voit que le domaine sous le solidus est un domaine monophasé qui touche le 100% du Nickel et le 100% du Cuivre. On peut donc tirer plusieurs conclusions de la lecture du diagramme.

1° Le solide corrélatif au domaine situé sous le solidus, c'est-à-dire l'alliage binaire Cu-Ni, a la même structure cristalline que le Nickel et la même structure cristalline que le Cuivre, donc Ni et Cu ont la même structure cristalline. On est face à un mélange à solubilité parfaite : le Cuivre et le Nickel sont parfaitement solubles.

2° Le solide produit dans le domaine situé sous la courbe du solidus est automatiquement une solution solide primaire de substitution : quand nous sommes situés à gauche du diagramme, nous avons affaire à une solution solide de Cuivre dans le Nickel ; inversement, quand nous sommes situés à droite du diagramme, nous avons affaire à une solution solide de Nickel dans le Cuivre. Ces deux métaux étant parfaitement solubles, le premier peut être le solvant du second et inversement le second devenir le solvant du premier.

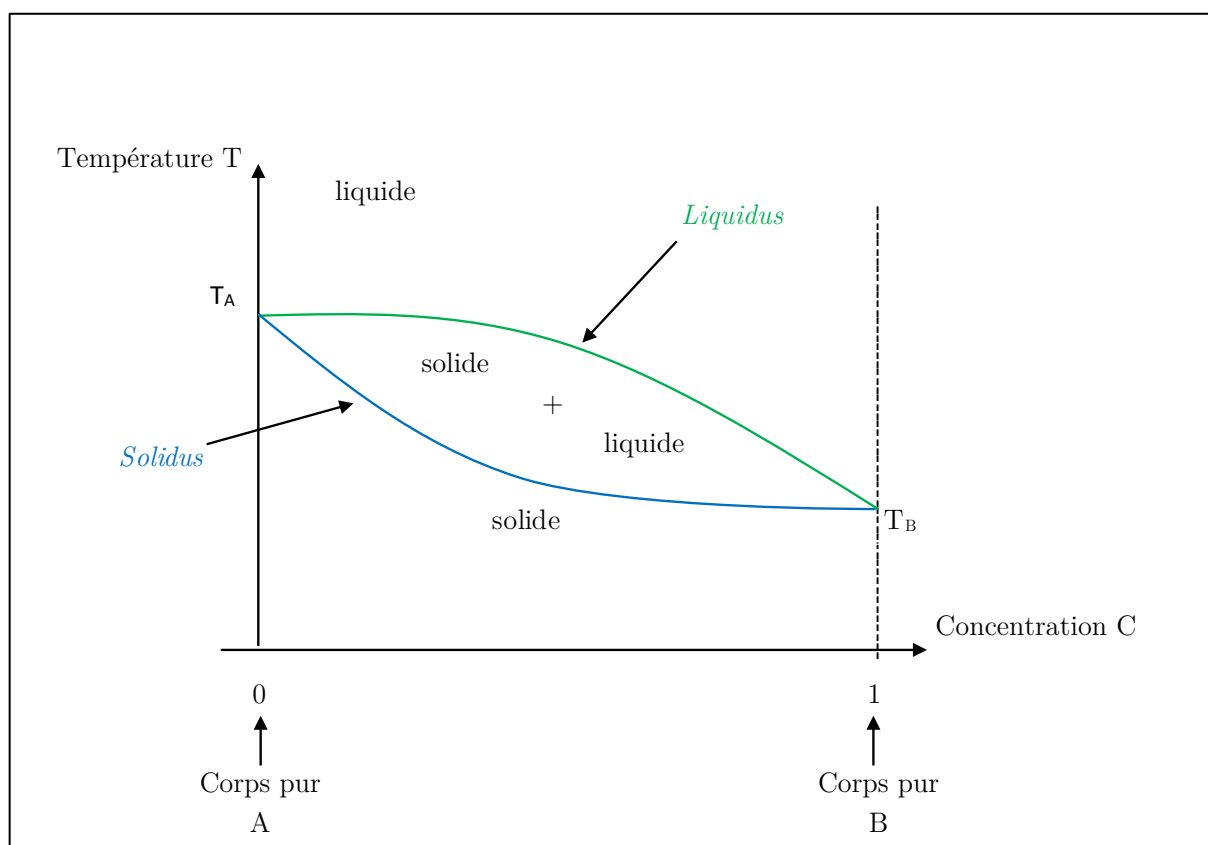


Figure 77 : Représentation généralisée du diagramme de phases

Nous pouvons à présent généraliser notre discours. Si nous nous positionnons à une concentration C_0 et à un certain point de température T_0 , alors nous obtenons une

concentration qui peut être représentée par un pourcentage en atomes du corps A et un pourcentage en atomes du corps B. On peut représenter ces pourcentages au moyen de petites boules symbolisant les atomes (voir Figure 78). Ce pourcentage peut aussi bien représenter le pourcentage en masse que le pourcentage en atomes des corps en présence :

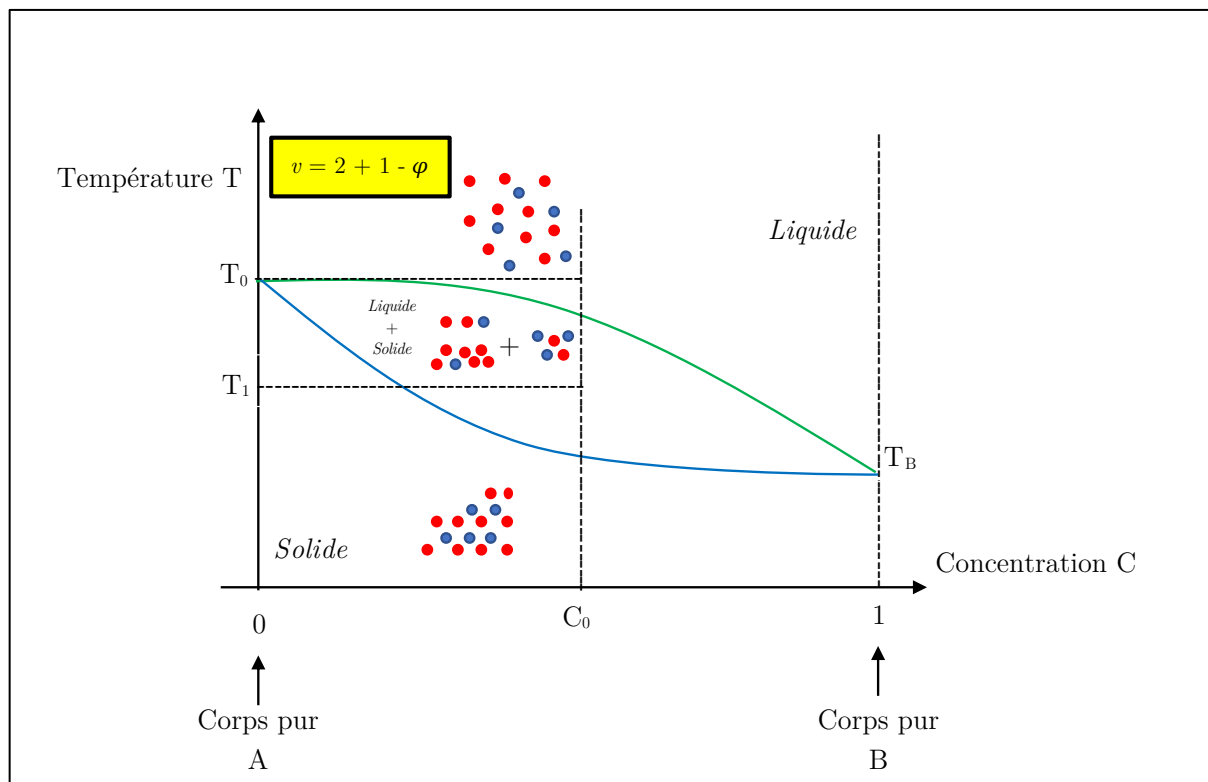


Figure 78 : Diagramme de répartition des concentrations en fonction des phases

Le positionnement des atomes dans la zone du domaine liquide du diagramme signifie que nous sommes en présence de la concentration initiale C_0 . La question qu'on peut alors se poser est la suivante : que va-t-il se passer lorsqu'on va regarder la variation de la composition au sein de ce mélange au fur et à mesure que l'on refroidit le système ? D'après la règle des phases, la variance v d'un système à l'équilibre est donnée par la formule :

$$v = c - r - k - + n - \varphi,$$

où c représente le nombre d'espèces chimiques en présence, r le nombre d'équilibres chimiques indépendants, k le nombre de paramètres imposés, n les équilibres mécanique et thermique dont dépend le système et φ le nombre de phases en équilibre dans le système.

Dans le cas que nous étudions, comme la pression est figée, seule la température varie. Comme nous raisonnons sur le cas d'un mélange sans contrainte extérieure dans lequel aucune réaction chimique n'a encore eu lieu et pour lequel le facteur d'équilibre donne $n = 1$ dans la mesure où le seul paramètre variable en jeu est la température, on obtient donc la relation :

$$v = c + 1 - \varphi.$$

Par conséquent pour une concentration constante C_0 , la variation de température appliquée au système va impliquer un changement de valeur de la variance dans la mesure où le nombre de phases va lui-même changer en fonction de la température. C'est ce que nous permet d'observer le diagramme de phases de la Figure 78.

Comme le liquidus et le solidus sont deux lignes de saturation, au moment où l'évolution de notre système entre dans le domaine biphasé du diagramme de phases, il prend une certaine concentration de saturation. La quantité d'atomes bleus et rouges à T_0 se réorganise entre T_0 et T_1 sous forme de solide et de liquide. Il y a donc diffusion d'atomes entre T_0 et T_1 : certains vont se réunir ensemble pour former un état solide, en l'occurrence les deux atomes bleus et les huit atomes rouges de l'exemple de la Figure 79 ; tandis que d'autres vont se réunir pour former un état liquide, ce qui est le cas des trois atomes bleus et des deux derniers atomes rouges du centre de la Figure 79 :

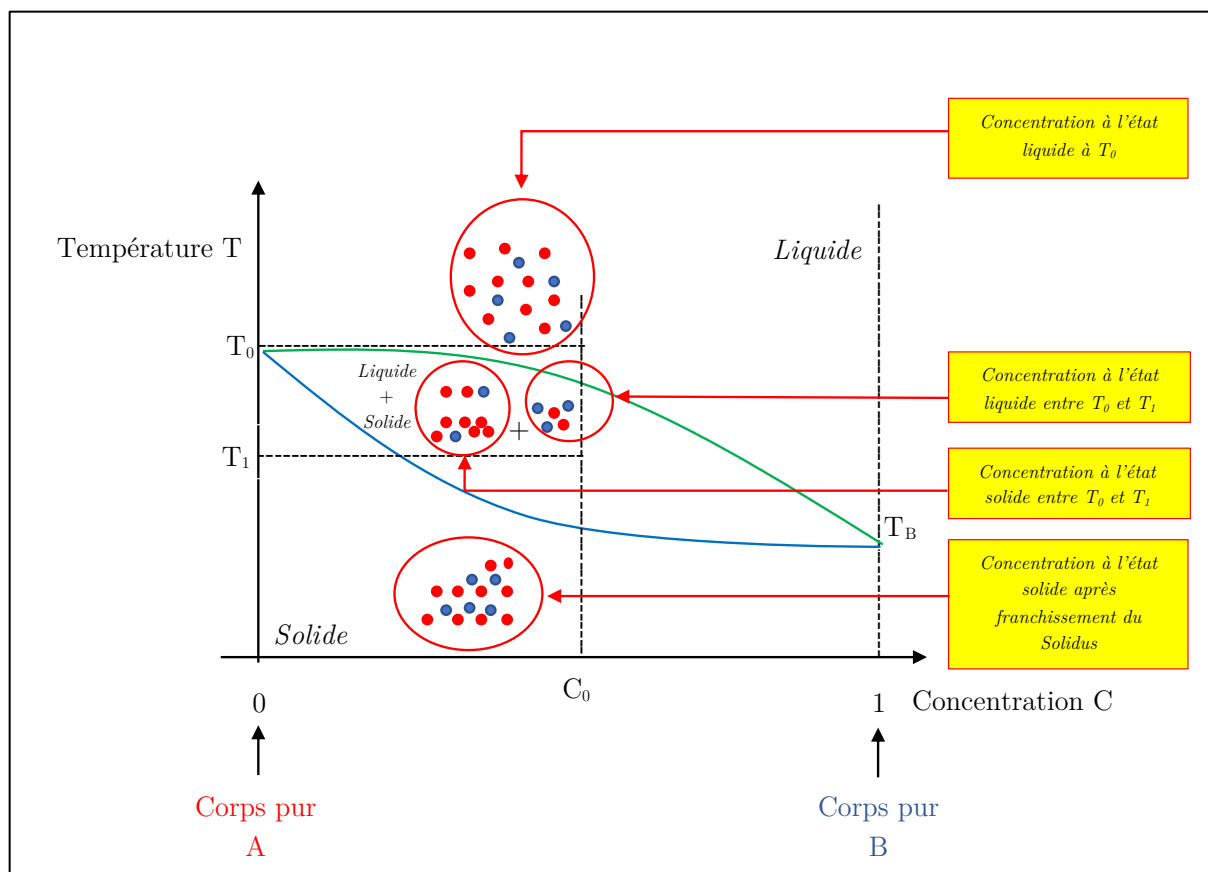


Figure 79 : Description du diagramme de répartition des concentrations en fonction des phases

Les regroupements solide et liquide donnent lieu à des concentrations différentes de part et d'autre du domaine biphasé, mais la somme des atomes bleus et rouges dans ce domaine nous donne la même concentration que celle donnée initialement, car il y a conservation de la masse pendant le refroidissement.

2.2 C'est en diagrammant qu'on devient forgeron : le diagramme d'Ellingham

Le diagramme d'Ellingham est un outil souvent utilisé en métallurgie pour trouver les conditions nécessaires à la réduction des minerais de métaux non nobles, dans la mesure où ces minerais sont des composés oxydés. Les oxydes, de formule générale M_xO_y , résultent de la combinaison de dioxygène avec un autre élément. L'extraction d'un métal non noble intervient ainsi très fréquemment par réduction de l'oxyde. C'est

pourquoi connaître les équilibres de formation des différents oxydes permet de mettre en place les conditions thermodynamiques qui gouvernent leurs réactions avec des agents réducteurs.

Le diagramme a été introduit pour la première fois par le chimiste britannique Harold Johann Thomas Ellingham dans un article publié en 1944¹⁷⁹. C'est un outil qui permet d'accéder à des données thermodynamiques sans avoir à faire des calculs répétitifs. Il consiste à représenter les variations de l'enthalpie libre standard $\Delta_r G^\circ$ de la réaction de formation d'un oxyde en fonction de la température (voir Figure 80) :

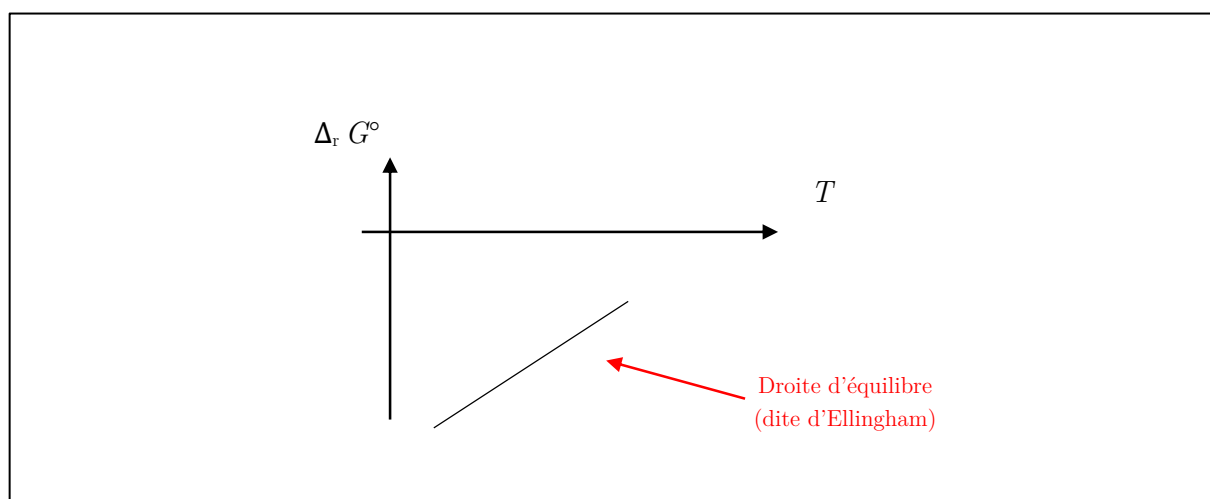


Figure 80 : Droite d'Ellingham

L'enthalpie libre standard de réaction ($\Delta_r G^\circ$) est une valeur particulière que prend l'enthalpie libre de réaction, lorsque le système est à l'état standard (un état fictif dans lequel tous les composants ont une activité égale à 1). Pour une réaction chimique, l'enthalpie libre standard de réaction est donnée par la formule suivante :

$$\Delta_r G^\circ = \Delta_r H^\circ - T \times \Delta_r S^\circ.$$

¹⁷⁹ H. J. T. Ellingham, « Transactions and Communications », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 63, n° 5, 1944, p. 125-160. Notre analyse du diagramme s'appuie sur les ressources du module de chimie suivant : https://uel.unisciel.fr/chimie/elements1/elements1_ch03/co/elements1_ch03.html

Avec :

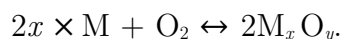
- T : la température absolue ;
- $\Delta_r G^\circ$: l'enthalpie libre standard de réaction ;
- $\Delta_r H^\circ$: l'enthalpie standard de réaction ;
- $\Delta_r S^\circ$: l'entropie standard de réaction.

L'approximation d'Ellingham consiste à envisager $\Delta_r H^\circ$ et $\Delta_r S^\circ$ comme des constantes sur une plage de température au cours de laquelle l'état des produits étudiés ne change pas.

Cela signifie que l'enthalpie libre standard de réaction est décrite par une fonction affine de la température dont le graphe est $\Delta_r G^\circ (T)$. Elle varie donc de façon linéaire en fonction de T . Lors d'un changement d'état d'un métal M ou d'un oxyde $M_x O_y$, l'entropie et l'enthalpie sont modifiées. Cela s'exprime graphiquement par un changement de pente de $\Delta_r G^\circ (T)$. Or à température et pression constantes, $\Delta_r G^\circ$ est reliée à la constante d'équilibre K de tout système chimique par la formule suivante :

$$\Delta_r G^\circ = -RT \times \ln K.$$

Où R est la constante des gaz parfaits. La loi d'action des masses à l'équilibre entre le métal (M), l'oxygène (O_2) et l'oxyde ($M_x O_y$) est donnée par la formule :



Donc :

$$K = e^{\left(-\frac{\Delta_r G^\circ}{RT}\right)} = \frac{(M_x O_y)^2}{O_2 \times M^{2x}}.$$

Les activités du métal M et de l'oxyde $M_x O_y$ sont égales à 1 car nous raisonnons dans une situation qui fait intervenir un corps pur et un composé pur à l'état condensé. L'activité du dioxygène gazeux pouvant être identifiée à sa pression partielle notée $P_{O_2,eq}$, on a donc :

$$\Delta_r G^\circ = -RT \times \ln \left(\frac{1}{P_{O_2,eq}} \right).$$

Ce qu'on peut aussi exprimer de la façon suivante :

$$\Delta_r G^\circ = RT \times \ln (P_{O_2,eq}).$$

Donc :

$$\ln (P_{O_2,eq}) = \frac{\Delta_r G^\circ}{RT}.$$

Ainsi en réinterprétant l'axe des ordonnées $\Delta_r G^\circ$ comme étant le logarithme de la pression d'oxygène multiplié par RT , on lui fait exprimer un potentiel d'oxydation. La droite d'Ellingham, dont l'équation correspond à :

$$f(T) = RT \times \ln (P_{O_2,eq}),$$

sépare ainsi le plan en deux régions qui permettent de distinguer deux zones d'existence, celle du métal et celle de l'oxyde, comme le montre la Figure 81 :

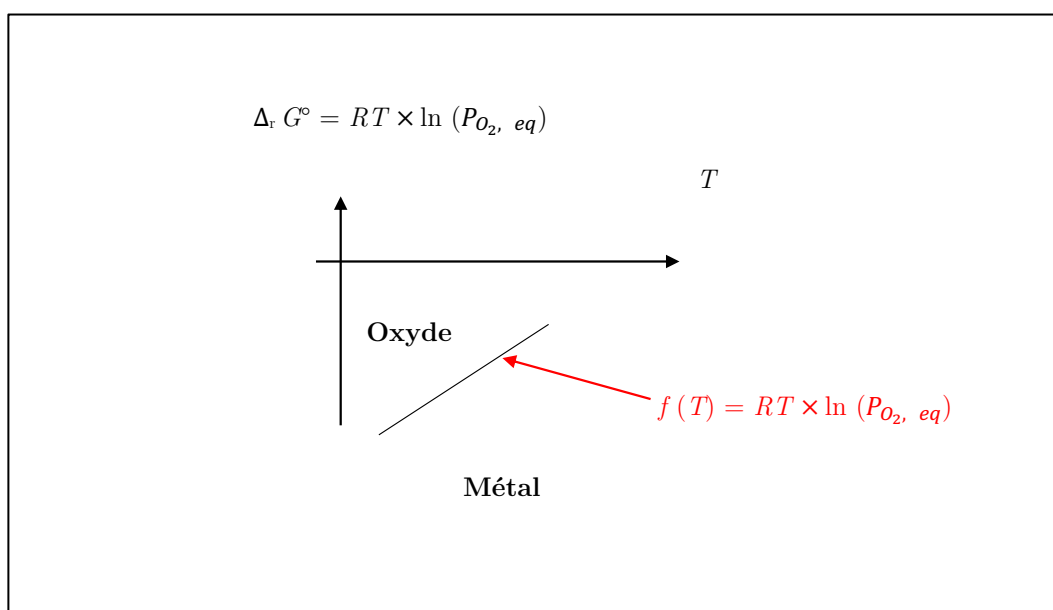


Figure 81 : Différenciation des zones d'existence d'un métal et d'un oxyde

L'oxydation du métal et la réduction de l'oxyde révèlent un partage symétrique du diagramme qui permet de faire apparaître les domaines de stabilité de l'oxyde et du métal (voir Figure 82) :

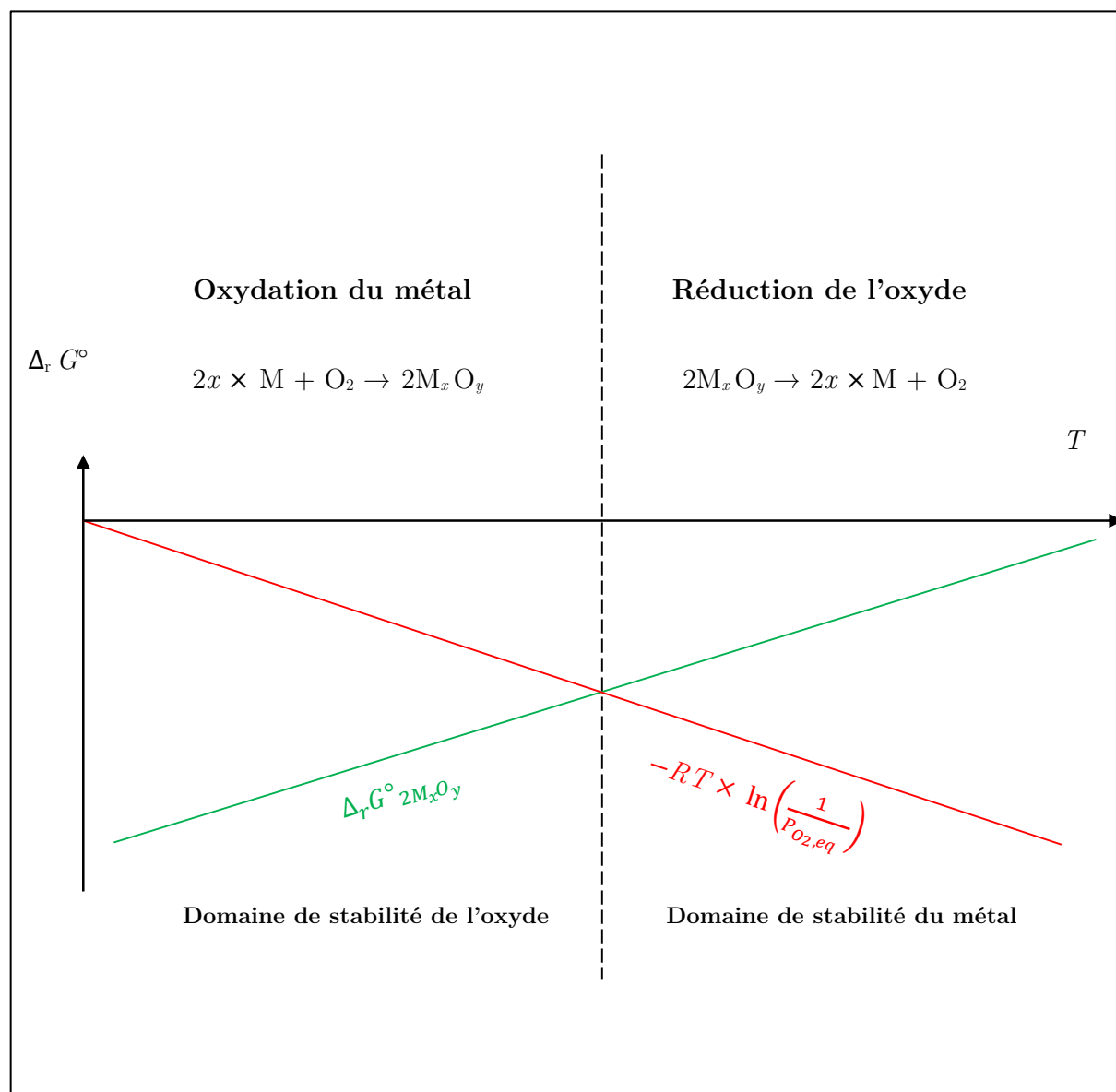


Figure 82 : Diagramme d'Ellingham pour l'oxydation

La droite d'Ellingham représente donc le lieu des températures où une espèce réductrice (Red) est en équilibre avec sa forme oxydée (Ox). Dans le diagramme, l'espèce oxydante d'un couple Ox/Red est stable au-dessus de la droite d'équilibre, d'où la mise

en évidence des domaines de prédominance. Si $P_{O_2} > P_{O_2,eq}$, on est dans le domaine de stabilité de l'oxyde ; si $P_{O_2} < P_{O_2,eq}$, on est dans le domaine de stabilité du métal :

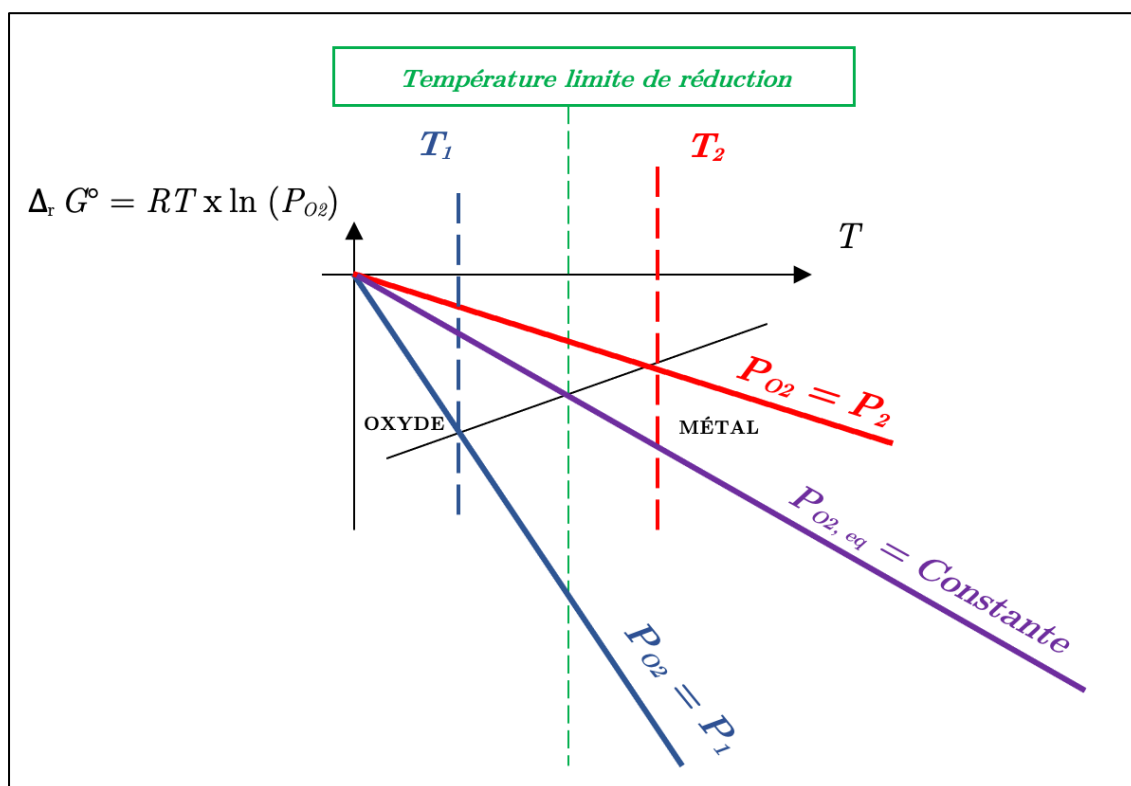


Figure 83 : Puissance déductive du diagramme d'Ellingham

En suivant les verticales T_1 et T_2 de la Figure 83, on obtient par intersection avec la droite d'Ellingham la valeur de l'enthalpie d'oxydation pour ces températures. En traçant les droites P_1 et P_2 partant de l'origine et passant par ces points, leur pente fournit la pression d'oxygène à l'équilibre pour ces points de température.

Le diagramme d'Ellingham de la Figure 84 donne ainsi l'enthalpie libre standard de réaction de plusieurs réactions d'oxydation par le dioxygène. Les températures de changement d'état sont indiquées par des lettres (F, E, S, T, f, e, s, t) qu'on peut voir en filigrane du diagramme de la Figure 84 et dont la signification est donnée dans le tableau situé en bas à droite à l'intérieur du diagramme :

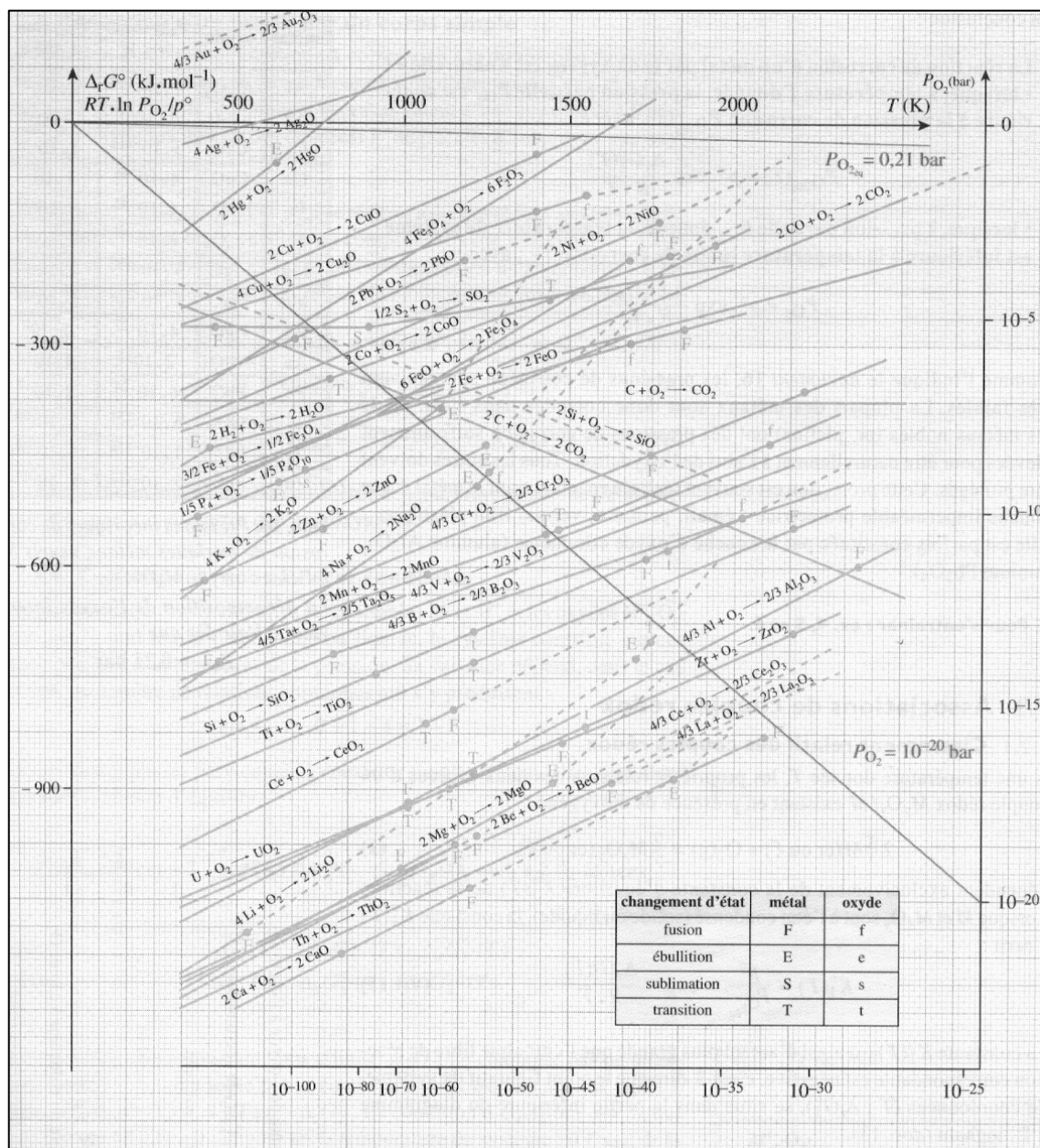


Figure 84 : Diagramme d'Ellingham donnant l'enthalpie libre standard de réaction de quelques réactions d'oxydation par le dioxygène¹⁸⁰

¹⁸⁰ S. Bordreux, « Lecture et utilisation des diagrammes d'Ellingham : application à la pyrométallurgie », Cours d'agrégation de physique, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, novembre 2003, Figure 2.1, p. 17.

3. Les diagrammes d'espace-temps

3.1 Le diagramme de Minkowski

Le mathématicien Hermann Minkowski a présenté dans une conférence donnée à Cologne en 1908 une étude mathématique de l'espace-temps à quatre dimensions, maintenant nommé *espace de Minkowski*¹⁸¹. Pour étudier la causalité et la simultanéité dans les espace-temps, il a utilisé un diagramme qui porte maintenant son nom : le *diagramme de Minkowski*. Par exemple¹⁸², on peut construire un diagramme de Minkowski pour représenter un référentiel R' en mouvement rectiligne uniforme à une vitesse $v = 0,6.c$ par rapport à un référentiel R :

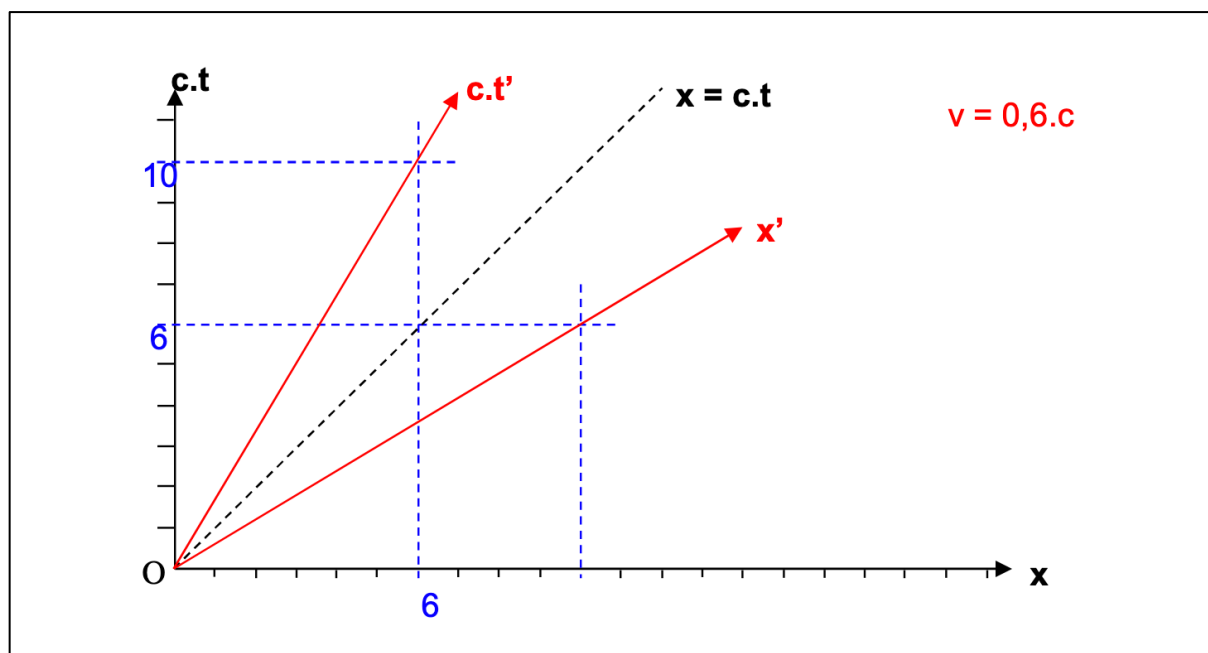


Figure 85 : Diagramme de Minkowski d'un référentiel en mouvement rectiligne uniforme par rapport à un autre référentiel¹⁸³

¹⁸¹ P. L. Galison, « Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World », *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 10, University of California Press, 1979, p. 90, Figure 1. Voir aussi : W. Scott, *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité restreinte, 1905-1915*, Thèse de doctorat en épistémologie et histoire des sciences, Université Paris 7, 1996.

¹⁸² Nous reprenons l'exemple tiré de : L. Moutet, *Diagrammes et théorie de la relativité restreinte*, Thèse de doctorat en didactique des sciences physiques, Université Paris 7, 2016, p. 34-35.

¹⁸³ L. Moutet, *ibid.*, Figure 23, p. 34.

Sur la Figure 85, $(xO_c.t)$ correspond au repère orthonormé du référentiel R . On trace la bissectrice $x = c.t$ (qui exprime graphiquement l'invariance de la vitesse de la lumière c dans le vide) puis la droite $x = 0,6 c.t$ qui correspond à :

$$c.t = \frac{x}{0,6},$$

soit :

$$c.t = \frac{10.x}{6}.$$

La droite $x = 0,6 c.t$ correspond à la ligne d'univers d'un objet qui commence son trajet en partant de l'origine du repère O en se déplaçant à la vitesse $v = 0,6.c$ dans le référentiel R . Ce déplacement correspond à la droite $O_c.t'$ des Figures 85 et 86. La droite Ox' doit être symétrique à la droite $O_c.t'$ suivant l'axe de la bissectrice $x = c.t$ car pour un objet en mouvement la lumière se déplace à la même vitesse. Les projections $c.t'_A$ et $c.t'_B$ sur l'axe $(O_c.t')$ de deux événements A et B qui se produisent simultanément dans le référentiel R doivent se faire parallèlement à l'axe (Ox') puisque ce dernier correspond à l'axe d'espace du référentiel R' , tandis que l'axe $(O_c.t')$ correspond à son axe de temps.

Si deux événements tels que A et B sont simultanés dans le référentiel R , cela signifie que $t_A = t_B$. Si on projette ces événements sur l'axe $(O_c.t')$ parallèlement à l'axe (Ox') , alors on observe que $t'_A > t'_B$. Cela signifie que dans le référentiel R' , l'événement A a lieu après l'événement B car la droite pointillée de couleur rouge parallèle à l'axe (Ox') qui traverse A se trouve au-dessus de celle qui traverse B :

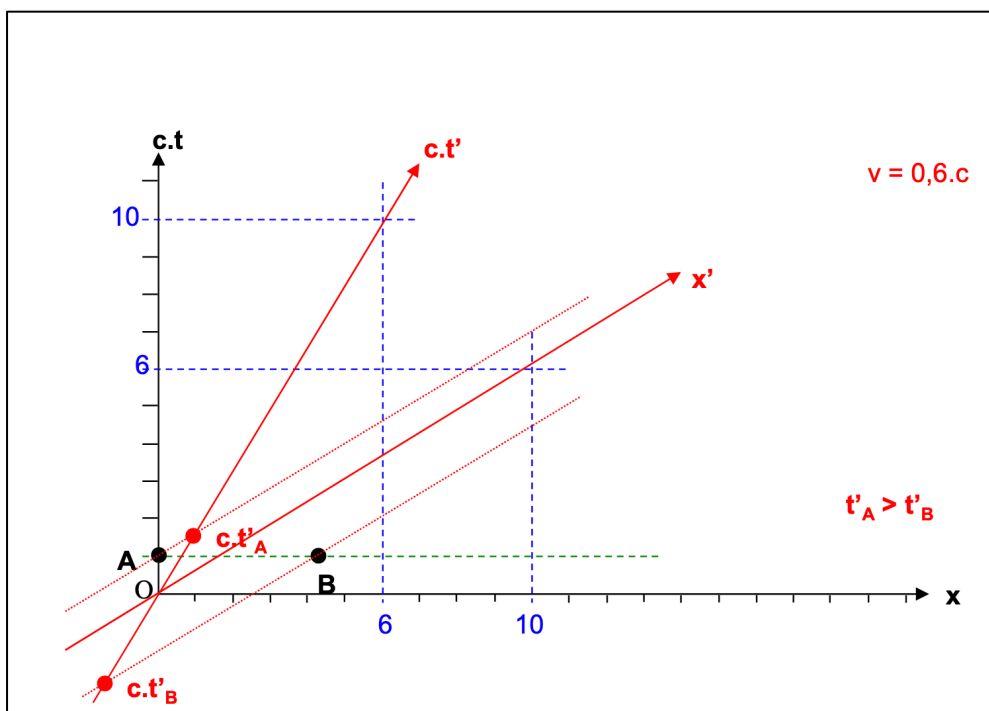


Figure 86 : Diagramme de Minkowski¹⁸⁴

Le diagramme de Minkowski rend donc possible la construction de l'intuition d'un phénomène décrit par la théorie de la relativité restreinte qui nous est spontanément contre-intuitif, à savoir la relativité de la simultanéité de deux événements en fonction de l'inscription du point de vue dans le référentiel depuis lequel ils sont observés. Il rend sensible ce que la transformation de Lorentz exprime mathématiquement de la manière suivante :

$$\begin{cases} t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

Figure 87 : Transformation de Lorentz

¹⁸⁴ L. Moutet, *ibid.*, Figure 24, p. 35.

où (x, y, z, t) et (x', y', z', t') représentent les trois coordonnées d'espace et celle du temps qui permettent d'identifier un même événement observé depuis deux référentiels R et R' en mouvement rectiligne et uniforme l'un par rapport à une vitesse relative v suivant l'axe des x , c désignant la vitesse de la lumière et γ le facteur de Lorentz tel que :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

La transformation de Lorentz, comme son nom l'indique, permet ainsi de convertir les coordonnées d'espace-temps d'un même événement observé depuis deux référentiels galiléens en mouvement de translation rectiligne uniforme dont l'un se déplace par rapport à l'autre à une vitesse v .

3.2 Le diagramme de Penrose-Carter

Un diagramme de Penrose-Carter est un type de diagrammes d'espace-temps introduit indépendamment par Roger Penrose et Brandon Carter dans les années 1960. Penrose les appelle aussi diagrammes conformes car ils mobilisent la notion de transformation conforme, un type de transformation d'une variété qui modifie la métrique en chaque point, mais conserve la structure causale. Un tel type de diagrammes représente différents infinis conformes notés par la lettre i (i étant l'initiale d'*infinity*) suivie en exposant de « 0 », « + » ou « - ». Les exposants « 0 » « + » ou « - » se réfèrent respectivement aux notions d'espace, de futur et de passé. Ces diagrammes ont été conçus pour constituer un outil graphique de navigation permettant de circuler au voisinage d'un trou noir et pour rendre visible dans le plan euclidien (c'est-à-dire sur une surface bidimensionnelle telle qu'une feuille de papier) la structure causale globale d'une géométrie donnée dans le cadre de la théorie de la relativité générale. La Figure 89 est un exemple de tel diagramme dans le cas d'un espace-temps de Minkowski :

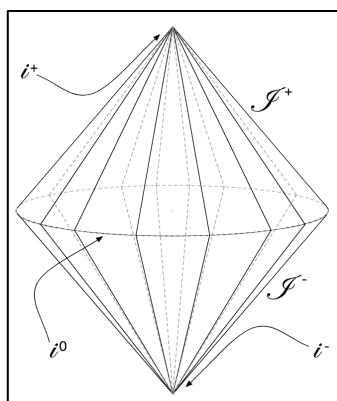


Figure 88 : Représentation dans l'espace d'un espace-temps de Minkowski compactifié¹⁸⁵

¹⁸⁵ Source de la Figure 87 : J.-P. Nicolas, « The conformal approach to asymptotic analysis » in L. Ji, A. Papadopoulos et S. Yamada (dir.), *From Riemann to Differential Geometry and Relativity*, Cham, Springer International Publishing, 2017, Figure 1.

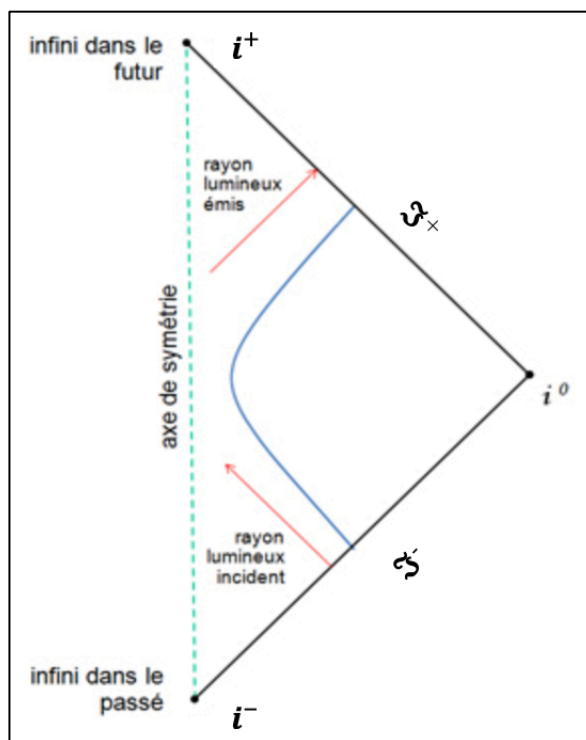


Figure 89 : Représentation dans le plan d'un espace-temps de Minkowski compactifié par un diagramme de Penrose-Carter¹⁸⁶

L'axe horizontal est celui de l'espace ; l'axe vertical, celui du temps, avec :

- i^0 l'infini spatial ;
- i^+ l'infini temporel futur ;
- i^- l'infini temporel passé ;
- \mathfrak{S}^+ l'infini du genre lumière dans le futur ;
- \mathfrak{S}^- l'infini du genre lumière dans le passé ;

Le caractère conforme du diagramme (voir Figure 89) implique qu'un rayon lumineux en provenance du passé se dirige suivant une droite inclinée à 45 degrés de la droite vers la gauche tandis qu'un rayon lumineux dirigé vers le futur empreinte une droite inclinée à 45 degrés de la gauche vers la droite. La courbe bleue représente quant à elle la trajectoire d'un objet qui provient de l'infini dans le passé et qui se dirige vers l'infini dans le futur.

¹⁸⁶ <http://chaours.rv.pagesperso-orange.fr/physique/Stars/Black/penrose.htm> (Figure modifiée)

Le diagramme de Penrose associé à la représentation d'un trou noir a quant à lui la structure suivante :

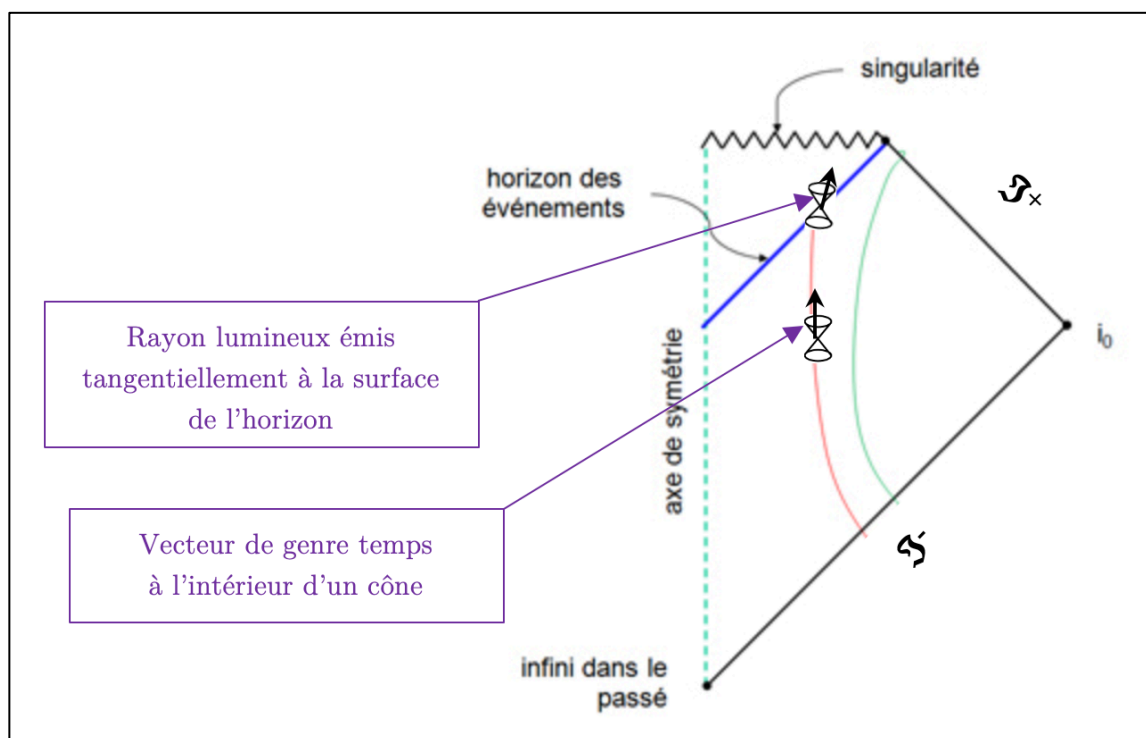


Figure 90 : Diagramme de Penrose-Carter représentant l'horizon d'un trou noir

En relativité générale, chaque point est associé à un cône (\mathcal{S}). Les conventions qui lui sont associées sont les suivantes : si un vecteur est situé à l'intérieur du cône, il est de genre temps ; s'il est *sur* le cône, il est de genre lumière ; s'il est à l'extérieur, il est de genre espace. La singularité du trou noir est représentée par la ligne horizontale noire en dents de scie dans le futur. Les lignes d'univers qui franchissent l'horizon du trou noir, qui est matérialisé par la ligne de couleur bleu, sont arrêtées par la singularité qui marque la fin du temps pour un objet piégé dans le trou noir. L'horizon du trou noir est représenté par une droite inclinée à 45 degrés dirigée vers la droite. Si un observateur, matérialisé par un cône sur la ligne de couleur rouge, émet un rayon lumineux tangentiellement à la surface de l'horizon, alors ce rayon est capturé et ne peut plus sortir du trou noir (voir Figure 90). Il continue de se propager jusqu'à l'infini « au sens de la géodésique ». La transformée conforme de l'horizon est donc identifiable à une géodésique du genre

lumière, c'est-à-dire à une droite dirigée vers la droite et inclinée à 45 degrés. Enfin la courbe vert d'eau représente un objet qui échappe au trou noir et rejoint l'infini \mathfrak{S}^+ du genre lumière dans le futur.

4. Les systèmes de notation du geste

4.1 Un exemple de diagramme de gestes artistiques : la cinétographie Laban

Noté le mouvement consiste à le consigner par écrit afin de rendre possible sa transmission, sa compréhension, son incorporation et sa reproduction. Si l'on dénombre actuellement une petite centaine de systèmes de notation du mouvement, trois systèmes ont été retenus : la notation Conté, la notation Benesch et la notation Laban. Nous présentons brièvement les principes du plus célèbre de ces systèmes de notation, le troisième d'entre eux.

La notation Laban est un système de notation du mouvement qui a été inventé en 1928 par le danseur et pédagogue hongrois Rudolf Laban. Le système est appelé *Labanotation* aux États-Unis, *Kinetography* au Royaume-Uni et *cinétographie* en France. On parle de système, car il s'agit d'établir un ensemble fini d'éléments dont la combinaison doit permettre d'écrire tous les mouvements humains possibles. Laban décompose ainsi chaque mouvement en six grandes catégories de composantes, codifiées et exprimées par des signes, qui répondent chacune aux questions suivantes :

- composantes motrices : quelles sont les parties du corps dont les mouvements coordonnés produisent le mouvement global recherché ?
- composantes spatiales : dans quel espace le mouvement s'inscrit-il et dans quelle direction est-il orienté ?
- composante dynamique : avec quelle énergie doit-il être exécuté ?
- composante hodologique : quels sont les différents chemins qu'il doit emprunter ?
- composantes rythmique et temporelle : dans quel intervalle de temps et suivant quel rythme doit-il se déployer ?

- composante relationnelle : comment l'individu en mouvement entre-t-il en interaction avec son entourage lors de sa performance chorégraphique ?

Les réponses à ces questions se matérialisent dans un espace d'inscription sur lequel se trouve la portée chorégraphique. L'axe principal, situé au centre de celle-ci, représente l'axe médian du corps de l'individu. Tout ce qui est situé à droite de cet axe correspond au côté droit du corps ; tout ce qui est à sa gauche, au côté gauche du corps. Une portée vide se présente de la façon suivante :

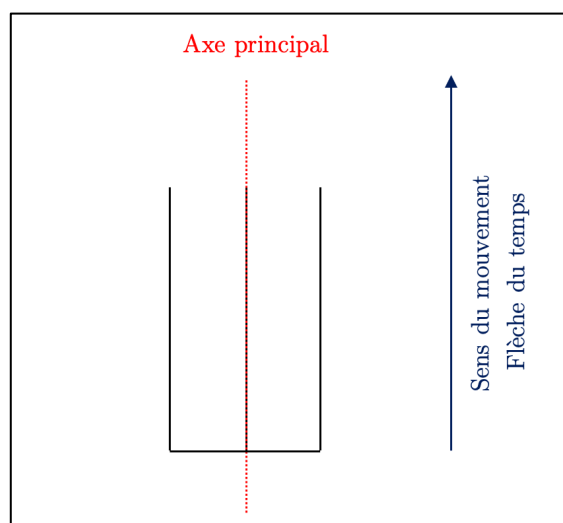


Figure 91 : Portée vide d'une partition chorégraphique en notation Laban

La portée est verticale, et se lit de bas en haut. Elle est composée de lignes parallèles en pointillés, dont les intervalles forment des colonnes :

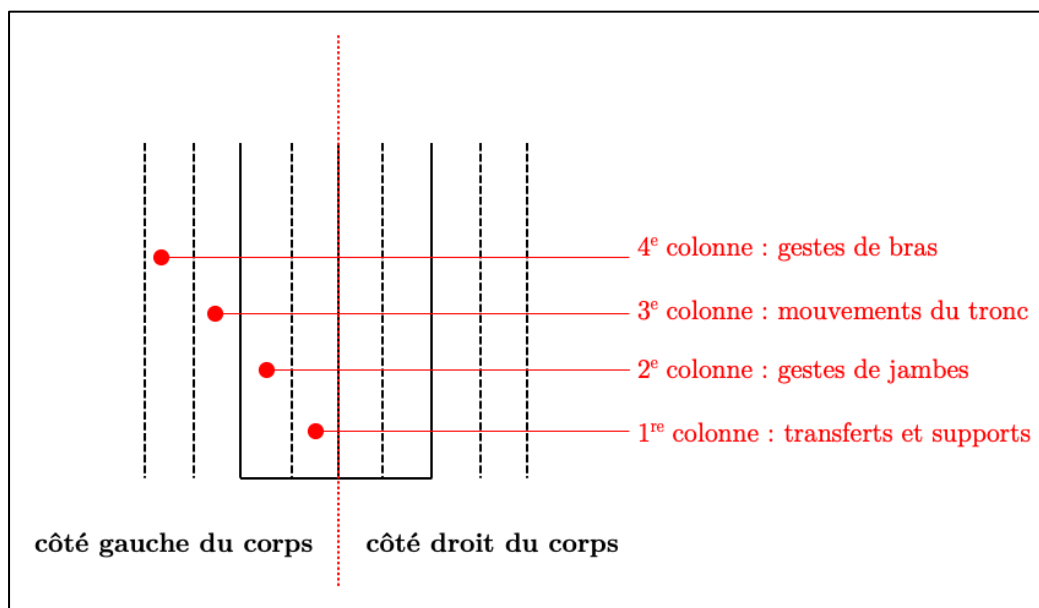


Figure 92 : Organisation de l'espace d'inscription d'une portée en notation Laban

Ces colonnes se rapportent aux parties du corps humain :

- les premières, de part et d'autre de l'axe médian, portent les signes des appuis du corps ;
- les deuxièmes portent ceux des mouvements de jambes ;
- les troisièmes ceux des mouvements du tronc ;
- les quatrièmes ceux des mouvements des bras ;
- les mouvements des coudes, des poignets, des mains et de la tête peuvent s'inscrire dans des colonnes supplémentaires.

Il y a deux grandes classes de signes :

- les signes représentant les parties du corps humain ;

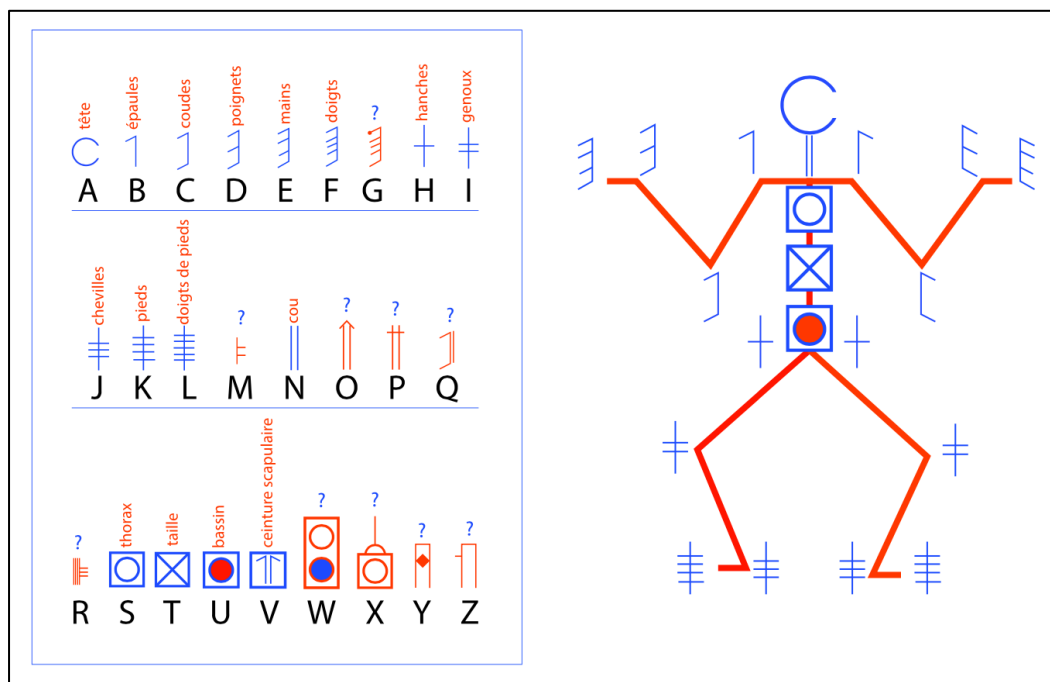


Figure 93 : Système de notation des parties du corps en cinéto-graphie Laban¹⁸⁷

- les signes de directions des gestes.

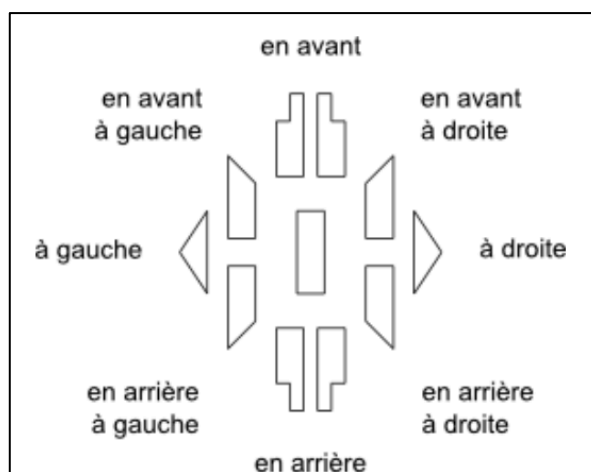


Figure 94 : Signes de directions des gestes en notation Laban

¹⁸⁷ <https://berthetandrea.files.wordpress.com/2014/06/labannotation1-jpg.pdf>

Le mode de coloration du signe indique le niveau du geste :

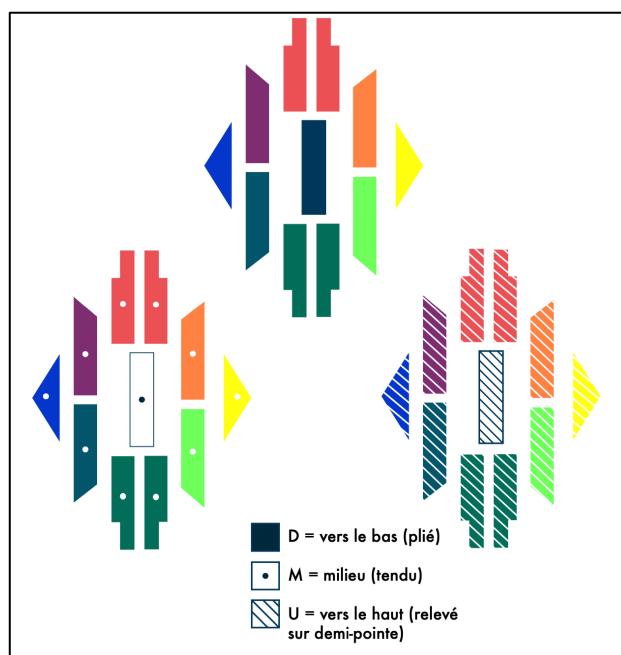


Figure 95 : Code couleurs de la notation Laban¹⁸⁸

Enfin la longueur du signe sur la portée indique la durée du geste. La lecture peut ainsi se faire verticalement et horizontalement, pour suivre l'ordre des transformations du mouvement dans leur succession et leur simultanéité. La portée de la Figure 96 :

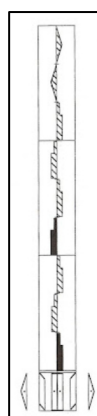


Figure 96 : Exemple de portée en cinégraphie Laban¹⁸⁹

se lit ainsi :

¹⁸⁸ <https://berthetandrea.files.wordpress.com/2014/06/labannotation2-jpg.pdf>

¹⁸⁹ http://media.staps.nantes.free.fr/L3EM_G3/Perrin_S/co/module_système%20de%20notation_9.html

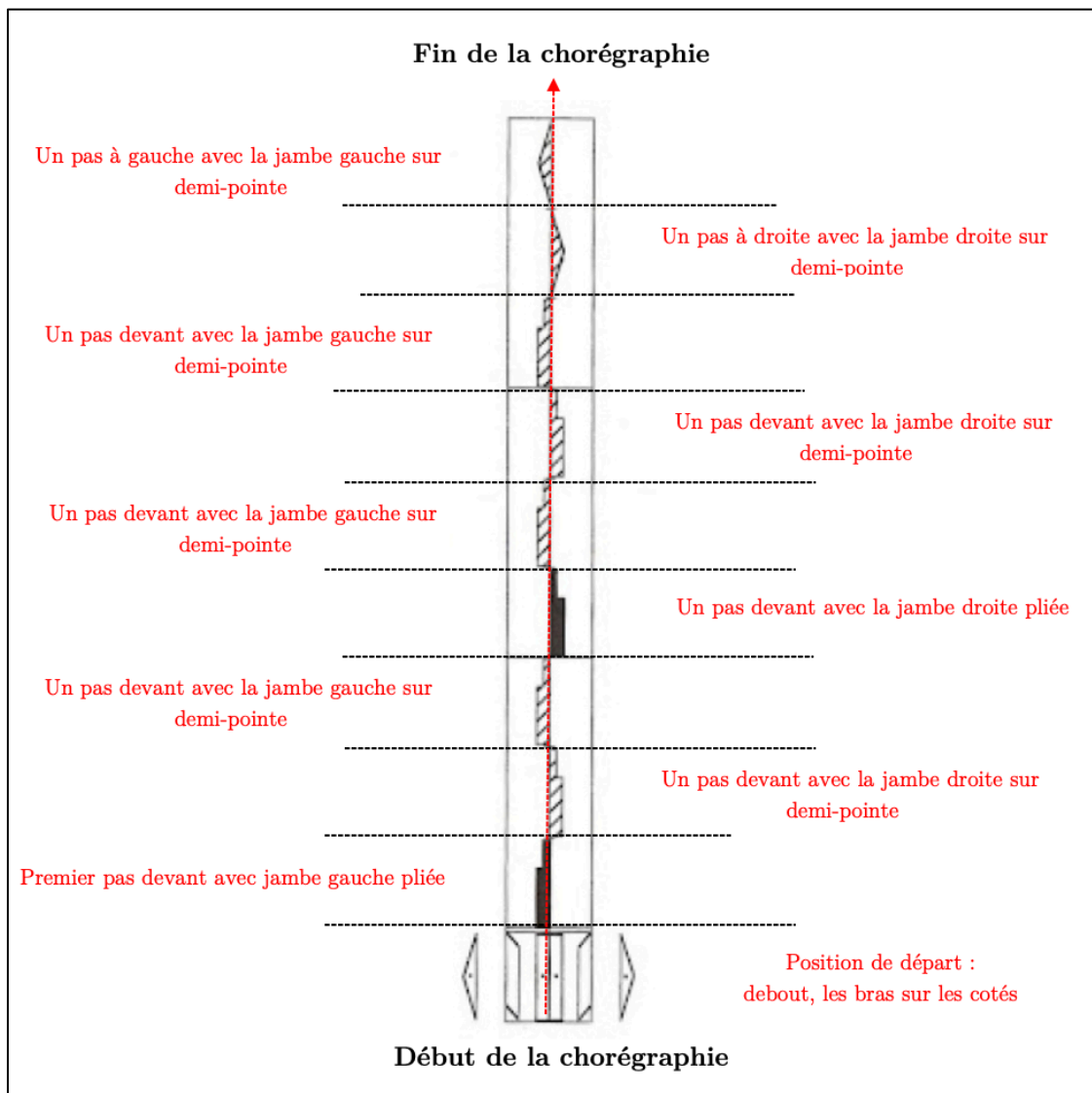


Figure 97 : Traduction de la portée de la Figure 96

4.2 Un exemple de diagramme de gestes pratiques : le mode d'emploi

Une machine sémiotique est un système de signes qui ne représente pas nécessairement une machine. C'est un dispositif graphique destiné à produire un résultat interprétable dans le monde de la représentation (par exemple une preuve en mathématiques) ou dans le monde réel (par exemple une tâche particulière comme l'utilisation d'un appareil) : ce dispositif est destiné à être lu pour être compris. Comprendre une machine sémiotique, c'est être capable de la lire. Mais lire une machine sémiotique, c'est la faire fonctionner. Or faire fonctionner une telle machine, c'est faire en la lisant, c'est-à-dire co-fonctionner avec elle. Cela signifie qu'une machine sémiotique est un dispositif de médiation situé entre la connaissance et l'action. Car la connaissance est la capacité à effectuer une action possible. Mais pour que le contenu d'une connaissance s'actualise dans une procédure, il faut disposer d'un métalangage de description du contenu visé par la connaissance, guidant sa traduction en procédures d'exécution. Construire un métalangage de description codifiant l'inscription des connaissances dans des formats de représentation ayant pour fonction de transformer les contenus qu'elle vise en instructions, telle est la fonction des modes d'emploi. Un mode d'emploi a pour fonction d'exprimer la lecture et la compréhension de ce dont il est mode d'emploi à travers des procédures exécutées qui réalisent ce dont la connaissance non formatée techniquement n'est que la représentation virtuelle inopérationnelle, c'est-à-dire théorique. Autrement dit, un mode d'emploi *machine* la représentation graphique pour *faire faire*.

Les modes d'emploi définissent la classe des documents techniques procéduraux. Par document, il faut entendre un objet matériel qui exprime un contenu. En tant que support matériel, le document est un support d'inscription qui supporte une forme interprétable (lettres, images, diagrammes, etc.) formatée dans un code de communication. On peut qualifier cette forme de sémiotique quand elle fait signe en direction d'un sens destiné à un lecteur. Lorsque c'est le cas, c'est ce sens qu'on appelle

le contenu du message véhiculé par le support. L'expression de ce contenu est alors contrainte par deux types de structure : une structure logique qui correspond à la mise en ordre des éléments du contenu et une structure matérielle qui correspond à la mise en forme de ces éléments, comme par exemple la typographie pour les lettres d'un texte¹⁹⁰. Un document est donc la synthèse d'une structure logique et d'une structure matérielle. En tant que structure logico-matérielle unifiée et identifiable, le document est le prototype de toute intelligence artificielle, car c'est un dispositif de reproductibilité qui instrumente notre rapport au monde en véhiculant un contenu de connaissance appropriable par les individus qui maîtrisent le code dans lequel ce contenu est formaté.

Un mode d'emploi, que ce soit une recette de cuisine, la notice ou le manuel d'utilisation d'un appareil, est un document comportant des instructions procédurales qui peuvent être présentées sous forme de texte seul, d'illustrations seules ou au moyen d'un mode d'exposition combinant texte et illustrations. L'ordre de lecture d'un mode d'emploi fait généralement l'objet d'un double marquage¹⁹¹ : un ordre des instructions correspondant à l'ordre des exécutions dont elles sont la signification et un ordre de numérotation redoublant l'ordre des instructions.

Dans une étude de psychologie cognitive ergonomique appliquée à l'étude de la lecture de documents techniques procéduraux¹⁹², des chercheurs ont proposé de structurer en trois formats d'instructions un mode d'emploi d'autocuseur, soumis à une population de cent vingt personnes. L'information véhiculée graphiquement pour exécuter les diverses procédures de manipulation de l'appareil était présentée dans trois formats

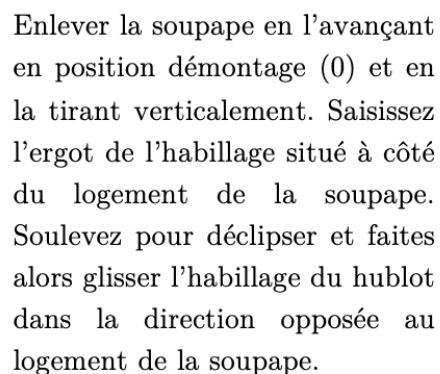
¹⁹⁰ B. Bachimont, « Bibliothèques numériques audiovisuelles : des enjeux scientifiques et techniques », *Document numérique*, vol. 2, n° 3-4, 1998, p. 219-242. Voir aussi : B. Bachimont, *Patrimoine et numérique*, Bry-sur-Marne, Ina, 2017.

¹⁹¹ F. Ganier, *Le traitement cognitif : déterminant de la conception de documents procéduraux*, Thèse de doctorat en psychologie, Université de Bourgogne, 1999, p. 8.

¹⁹² F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », *Le travail humain*, vol. 63, n° 2, 2000, p. 121-152.

d'instructions (texte seul, illustration seule, combinaison de texte et d'illustration) et deux niveaux de fragmentation (information non fragmentée versus information fragmentée). L'expérience reposait ainsi sur six formats d'instructions :

- le format « Texte non fragmenté » (1), exposant linéairement toutes les instructions en une suite de phrases dactylographiées (voir Figure 98) ;



Enlever la soupape en l'avancant en position démontage (0) et en la tirant verticalement. Saisissez l'ergot de l'habillage situé à côté du logement de la soupape. Soulevez pour déclipser et faites alors glisser l'habillage du hublot dans la direction opposée au logement de la soupape.

Figure 98 : Mode d'emploi formaté en texte non fragmenté¹⁹³

- le format « Texte fragmenté » (2), exposant les mêmes instructions dactylographiées, mais fragmentées en paragraphes suivant le principe consistant à associer à chaque paragraphe une tâche à effectuer (voir Figure 99) ;

¹⁹³ Source de la Figure 98 (Figure modifiée) : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 1, p. 144.

1. Enlever la soupape en l'avancant en position démontage (0) et en la tirant verticalement.
2. Saisissez l'ergot de l'habillage situé à côté du logement de la soupape.
3. Soulevez pour déclipser.
4. Faites alors glisser l'habillage du hublot dans la direction opposée au logement de la soupape.

Figure 99 : Mode d'emploi formaté en texte fragmenté¹⁹⁴

- le format « Illustration non fragmentée » (3), exposant la tâche à effectuer en une seule prise photographique (voir Figure 100) ;



Figure 100 : Mode d'emploi formaté en illustration non fragmentée¹⁹⁵

- le format « Illustration fragmentée » (4), présentant une tâche par prise photographique (voir Figure 101) ;

¹⁹⁴ Source de la Figure 99 (Figure modifiée) : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 1, p. 144.

¹⁹⁵ Source de la Figure 100 : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 2, p. 145.

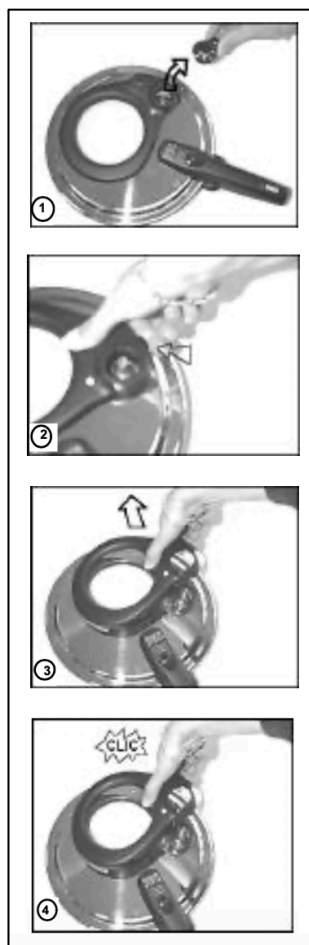


Figure 101 : Mode d'emploi formaté en illustration fragmentée¹⁹⁶

- le format « Texte + illustration non fragmentés » combinant les formats (1) et (3) (voir Figure 102) ;

¹⁹⁶ Source de la Figure 101 : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 3, p. 146.

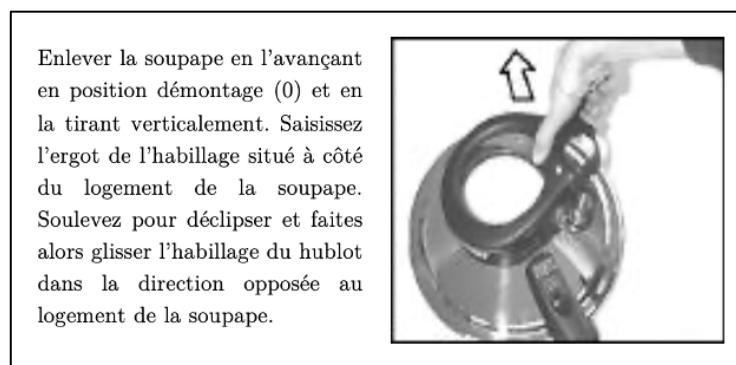


Figure 102 : Mode d'emploi formaté en texte et illustration non fragmentés¹⁹⁷

- le format « Texte + illustration fragmentés », combinant les formats (2) et (4) (voir Figure 103)

¹⁹⁷ Source de la Figure 102 (Figure modifiée) : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 4, p. 147.

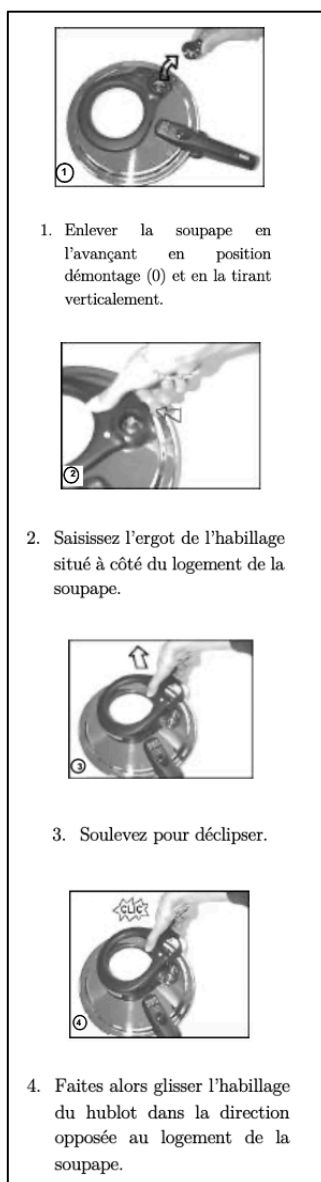


Figure 103 : Mode d'emploi formaté en texte et illustration fragmentés¹⁹⁸

¹⁹⁸ Source de la Figure 103 (Figure modifiée) : F. Ganier, J. Gombert et M. Fayol, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », art. cit., Annexe 5, p. 148.

BILAN DU CHAPITRE 5

L'étude d'une première classe de diagrammes, les *diagrammes ternaires*, nous a permis de remarquer qu'un diagramme est une machine graphique composite, parfois complexe, douée de propriétés sémiotiques. Le diagramme ternaire est une machine sémiotique, car il peut par exemple permettre de générer la figuration d'une dynamique de développement, comme dans le cas de son utilisation en géographie. Ce peut être une machine composite, comme dans le cas du diagramme de De Finetti, car plongé dans un repère, il permet d'exploiter simultanément un théorème de géométrie (le théorème de Viviani) et une théorie génétique (le principe de Hardy-Weinberg) dont le couplage a des applications dans des domaines variés (l'épidémiologie ou encore l'agronomie). Une deuxième classe, celle des *diagrammes de phases*, définit celle des machines graphiques permettant de contrôler des processus thermodynamiques à des fins d'application artisanale (bijouterie) ou industrielle (pyrométallurgie). Une troisième classe, les diagrammes d'espace-temps, révèlent que cette machine graphique qu'est un diagramme peut fonctionner comme un amplificateur d'intuition : il peut permettre de sémiotiser des phénomènes contre-intuitifs (comme la dilatation du temps ou l'absorption d'un rayon lumineux au voisinage d'un trou noir) dont permettent de rendre compte des théories scientifiques portant sur l'infiniment grand (les théories de la relativité restreinte et générale). Les vertus méthodologique et générative des diagrammes sont révélées par une quatrième classe de diagrammes, les *systèmes de notation du geste*, qui ne portent pas le nom de diagrammes alors que leur mode de fonctionnement est foncièrement diagrammatique. En effet, la cinétographie Laban et les modes d'emploi sont des machines à programmer sémiotiquement le geste de l'homme au travail, qu'il soit danseur ou monsieur Tout-le-monde confronté à un problème pratique du quotidien (monter une étagère, poser un filtre à eau, réparer une cafetière, manipuler un autocuiseur, etc.).

PLAN DU CHAPITRE 6

L'objectif de ce chapitre est de présenter une typologie opérationnelle des diagrammes. Nous proposons de distinguer cinq fonctions opérationnelles à travers plusieurs études de cas :

- résoudre des problèmes techniques (à travers l'étude de l'abaque de Smith) ;
- résoudre des problèmes vitaux (à travers l'étude du diagramme de Davenport) ;
- faciliter la pratique de calculs (à travers l'étude des diagrammes de Feynman et Randolph) ;
- comprendre le fonctionnement de machines thermodynamiques (à travers l'étude du diagramme de Clapeyron et du diagramme enthalpique de l'hydrofluorocarbone R-134a) ;
- machiner une théorie scientifique pour en exhiber les hypothèses, les mécanismes et les conséquences, c'est-à-dire en connaître les tenants et aboutissants (à travers l'analyse du diagramme de Darwin).

CHAPITRE 6. TYPOLOGIE OPERATIONNELLE DES DIAGRAMMES

1. Ingénier le sémiotique pour résoudre des problèmes techniques et vitaux

1.1 L'abaque de Smith

L'adaptation d'impédance est un procédé utilisé en électricité pour optimiser le transfert d'une puissance électrique entre un émetteur (source) et un récepteur (charge) afin de parfaire la transmission d'informations grâce à des signaux de télécommunications¹⁹⁹ véhiculés à travers une ligne (de transmission) qui permet d'opérer cette adaptation. L'abaque de Smith est l'outil graphique qui a été inventé pour résoudre ces problèmes techniques de transmission : « l'une de ses applications les plus simples consiste à déterminer l'impédance du point d'alimentation d'une antenne, sur la base d'une mesure d'impédance effectuée à l'entrée d'une ligne de transmission de longueur aléatoire ». Par exemple, « la mesure de l'impédance peut être effectuée avec l'antenne en place au sommet d'un pylône²⁰⁰ ».

Un point de l'abaque représente une impédance, en donnant la valeur de sa partie réelle et de sa partie imaginaire dans le plan complexe. Ce plan est par ailleurs maillé par un réseau d'« isocourbes » composé des cercles de résistance et des arcs de réactance. Les cercles de résistance sont centrés sur l'axe de la résistance et sont tangents à un axe (voir l'axe tangentiel rouge de la Figure 104). À chaque cercle est associée une valeur de résistance, qui est indiquée au point où ce cercle croise l'axe de la résistance. Tous les points le long d'un cercle ont la même valeur de résistance, raison pour laquelle on parle d'« isocourbes ». Si on attribue au point central une valeur de 100Ω , la résistance de 200Ω est représentée par le cercle 2,0, celle de 50Ω par le cercle 0,5, celle de 20Ω par le cercle 0,2, etc. C'est ce que montre la Figure 104 :

¹⁹⁹ La source de notre analyse de l'abaque de Smith est le chapitre 28 du manuel de référence sur la propagation des signaux radio et la construction des systèmes d'antennes : R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book: The Ultimate Reference for Amateur Radio Antennas, Transmission Lines and Propagation*, 21th ed., Newington, Connecticut, American Radio Relay League, 2007. Nous traduisons les extraits cités.

²⁰⁰ R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book, op. cit.*, ch. 28, p. 1.

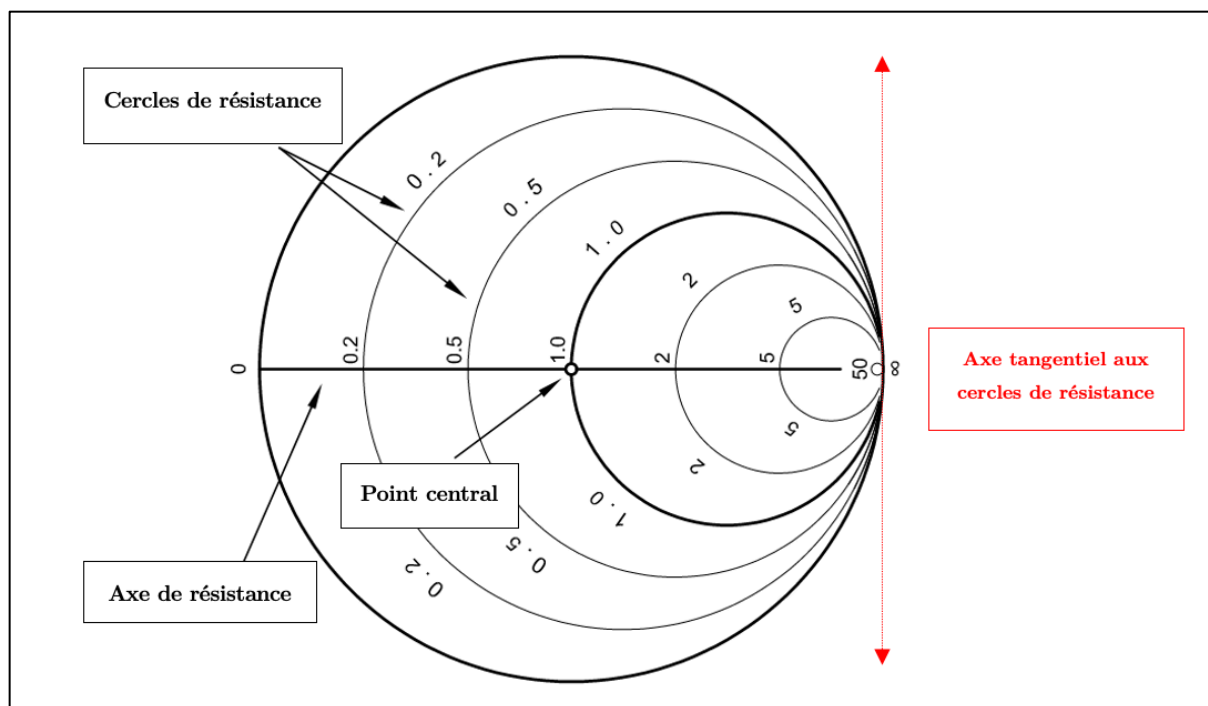


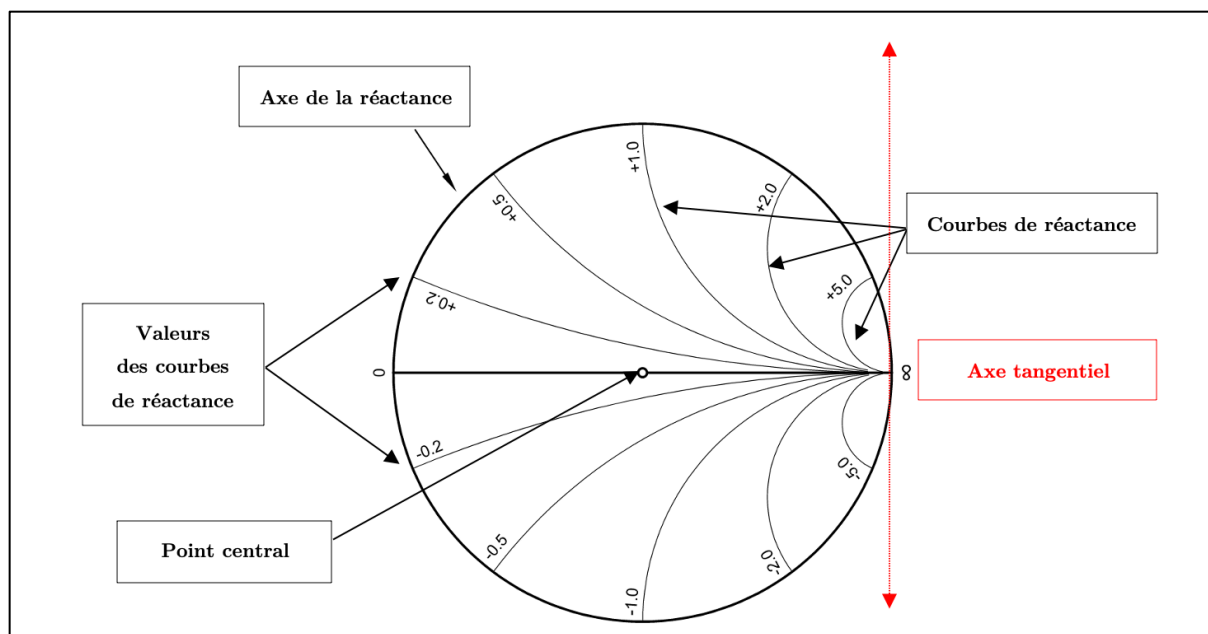
Figure 104 : Roue de résistance de l'abaque de Smith²⁰¹

Si on considère à présent les lignes de réactance (voir Figure 105), elles apparaissent comme des courbes tangentes à l'axe de la résistance qui divergent pour venir intersecter les cercles de résistance. Les centres des cercles dont ces arcs sont des parts de circonférence sont quant à eux déplacés vers le haut ou le bas sur l'axe tangentiel aux cercles de la résistance. Le grand cercle extérieur délimitant la partie de l'abaque où apparaissent les valeurs de ce deuxième type d'isocourbes est l'axe de la réactance (voir Figure 105) :

Chaque courbe de réactance se voit attribuer une valeur, indiquée au point où la courbe touche l'axe de la réactance. Tous les points d'une même courbe de réactance ont la même valeur. Comme pour les cercles de résistance, les valeurs attribuées à chaque courbe de réactance sont normalisées par rapport à la valeur attribuée au point central. Les valeurs situées en haut de l'axe de la résistance sont positives (inductives) ; celles situées en bas de cet axe sont négatives (capacitives)²⁰².

²⁰¹ Source de la Figure 104 (Figure modifiée) : R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book*, op. cit., ch. 28, Figure 1, p. 1.

²⁰² R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book*, op. cit., ch. 28, p. 2.

Figure 105 : Roue de réactance de l'abaque de Smith²⁰³

Si on travaille sur une ligne de transmission ayant une impédance caractéristique \underline{Z} telle que $\underline{Z} = 50 \Omega$ et une longueur électrique L_e telle que $L_e = 0,3 \lambda$ et que cette ligne se termine avec une impédance ayant une résistance R telle que $R = 25 \Omega$ et une réactance X telle que $X = 25 \Omega$, alors $\underline{Z} = 25 + j 25$. En effet la relation entre l'impédance, la résistance et la réactance est donnée par la formule suivante :

$$\underline{Z} = R + j X,$$

²⁰³ Source de la Figure 105 (Figure modifiée) : R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Hallidy (eds.), *The ARRL Antenna Book*, op. cit., ch. 28, Figure 2, p. 2.

Avec :

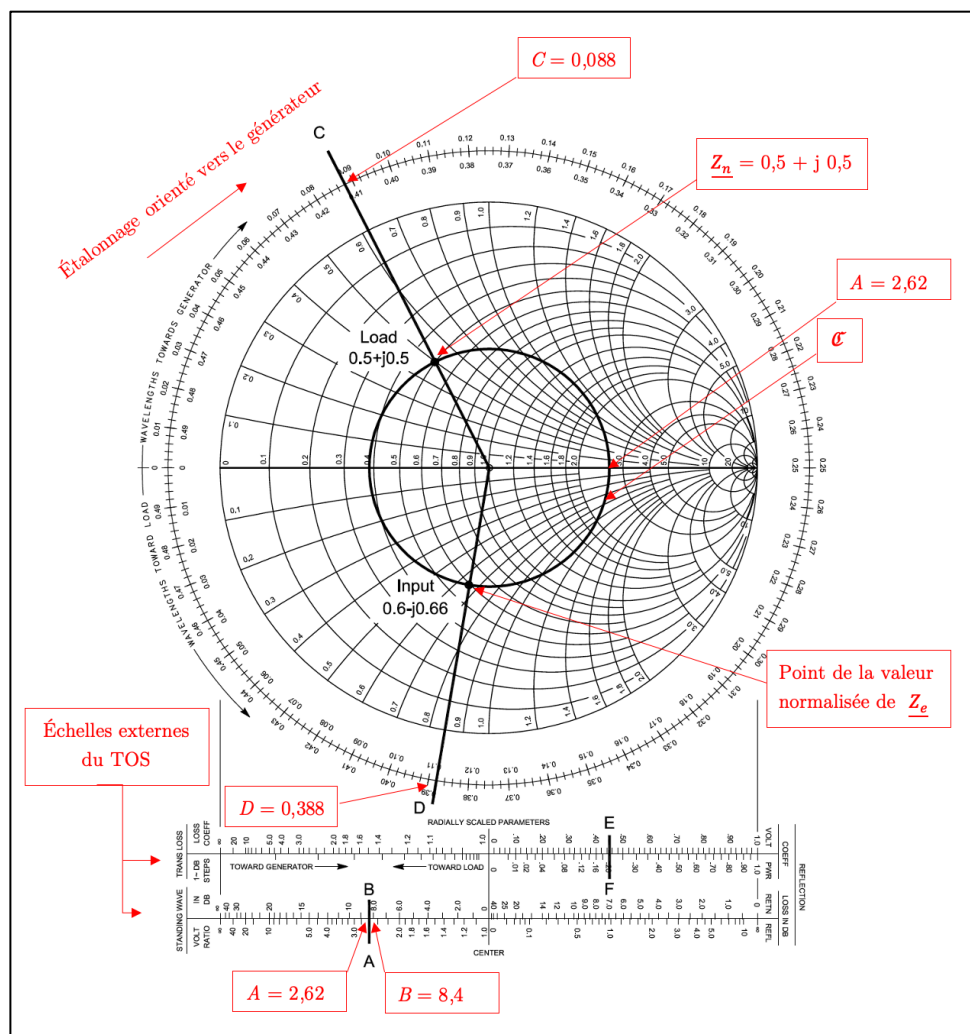
- \underline{Z} l'impédance, en Ω ;
- R la résistance, en Ω ;
- j l'unité imaginaire des nombres complexes ;
- X la réactance, en Ω .

Dès lors on peut se poser la question suivante : quelle est l'impédance d'entrée \underline{Z}_e de la ligne ? L'abaque de Smith répond à la question en fournissant une méthode graphique de calcul. En effet, comme l'impédance caractéristique de la ligne étudiée est de 50Ω , il faut commencer par attribuer cette valeur au centre de l'axe de résistance. « Comme la ligne n'est pas terminée dans son impédance caractéristique, nous savons que des ondes stationnaires existeront sur celle-ci et que la valeur de l'impédance d'entrée ne sera pas exactement de 50Ω ²⁰⁴ ». La réflectométrie nous apprend en effet qu'en injectant un signal dans un milieu, celui-ci se propage selon une vitesse et une atténuation toutes deux conditionnées par le milieu traversé²⁰⁵. Lorsque le signal rencontre une altération du milieu nommée *rupture d'impédance*, une partie de son énergie est réfléchie vers son point d'émission. L'étude du signal réfléchi en fonction du temps permet de déduire la position et le type de discontinuité rencontrée par le signal incident.

Il faut tout d'abord normaliser l'impédance de la charge en divisant la résistance et la réactance par 50. L'impédance normalisée \underline{Z}_n dans ce cas est telle que $\underline{Z}_n = 0,5 + j 0,5$. Elle est obtenue sur le graphique à l'intersection des courbes de résistance 0,5 et de réactance + 0,5, comme on peut l'observer sur la Figure 106 :

²⁰⁴ R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Hallidy (eds.), *The ARRL Antenna Book*, op. cit., ch. 28, p. 4.

²⁰⁵ M. Durand-Gasselin, *Mise au point d'un dispositif de mesure d'impédance complexe, micro-onde et cryogénique*, mémoire présenté au département de physique en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences, Sherbrooke, Québec, Canada, 2 novembre 2018, p. 3.


 Figure 106 : Abaque de Smith²⁰⁶

On trace ensuite le cercle \mathcal{C} du taux d'onde stationnaire (TOS) constant passant par ce point, puis on reporte la valeur du point d'intersection du rayon de ce cercle et de sa circonférence sur les échelles externes :

Sur l'échelle externe du TOS, on peut voir en A que le rapport de tension de 2,62 existe pour ce rayon, ce qui indique que la ligne fonctionne avec un rapport de tension d'onde stationnaire de 2,62 pour 1. Cette valeur est convertie en décibels sur l'échelle adjacente, où on peut lire que $B = 8,4$ dB, ce qui indique que le rapport entre la tension maximale et la tension minimale le long de la ligne est de 8,4 dB.

À l'aide d'une règle, on trace une ligne radiale à partir du centre principal en passant par le point tracé [c'est-à-dire par \underline{Z}_n] et en coupant l'échelle des longueurs d'onde. À cette intersection, le point C permet de lire une valeur sur l'échelle des longueurs d'onde. Comme nous partons de la charge, nous devons

²⁰⁶ Source de la Figure 106 (Figure modifiée) : R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book*, op. cit., ch. 28, Figure 6, p. 4.

utiliser l'étalonnage orienté vers le générateur, qui nous donne la valeur $0,088 \lambda$.

Pour obtenir la valeur de l'impédance d'entrée de la ligne [que nous avons appelée \underline{Z}_e], il faut donc trouver le point D sur le cercle TOS qui est $0,3 \lambda$ vers le générateur à partir de l'impédance de charge. On le trouve en ajoutant $0,3$ (la longueur de la ligne en longueurs d'onde) au point de référence $0,088$. Par conséquent : $D = 0,388$. Si on trace une deuxième ligne radiale depuis le point D vers le point central, alors le point d'intersection de la nouvelle ligne radiale avec \mathcal{C} nous donne la valeur de l'impédance d'entrée de ligne normalisée : $0,6 - j 0,66$.

Pour trouver l'impédance de ligne non normalisée, on multiplie par 50 , la valeur attribuée au centre principal. La valeur obtenue est $30 - j 33$, soit une résistance de 30Ω et une réactance capacitive de 33Ω . Il s'agit de l'impédance à laquelle un émetteur doit s'adapter [par conséquent $\underline{Z}_e = 30 - j 33$]²⁰⁷.

²⁰⁷ R. D. Straw, L. B. Cebik & D. Halliday (eds.), *The ARRL Antenna Book, op. cit.*, ch. 28, p. 4-5.

1.2 Le diagramme de Davenport

En physiologie acido-basique, le diagramme de Davenport est un outil graphique qui a été introduit par Horace W. Davenport en 1947. Il permet à un médecin de décrire les concentrations de bicarbonate (HCO_3^-) dans le sang et le pH de ce dernier suite à une perturbation acido-basique de nature respiratoire et/ou métabolique²⁰⁸.

L'état acide de l'organisme est défini par la concentration en ions hydrogène (H^+). La variable mesurée pour juger de cet état est la concentration en ions H^+ du sang artériel. Le pH est un nombre sans unité de mesure : il permet de quantifier le caractère acide ou basique d'une solution. Il correspond au logarithme négatif de l'activité des ions H^+ . Le choix d'une échelle logarithmique (en puissance de 10) permet de représenter de fortes différences de concentrations mesurées grâce à de faibles différences de pH.

Le maintien du pH dans l'organisme, qui est l'un des aspects de l'homéostasie, est régulé grâce à des mécanismes physico-chimiques (assurés par les systèmes tampons du sang), pulmonaires (qui assurent l'élimination du gaz carbonique) ou rénaux (qui ajustent la réserve en base de l'organisme).

Pour étudier l'équilibre acido-basique, on peut étudier le pH du sang. On considère que son pH normal peut varier entre 7,35 et 7,45. Au-dessous de 7,35, le pH sera trop acide et on parlera alors d'*acidémie* ; tandis que s'il se situe au-dessus de 7,45, il sera trop basique et on parlera alors d'*alkalémie*.

Pour étudier des valeurs de pH, il faut étudier certaines valeurs de concentrations dans le sang. La première est celle en dioxyde de carbone (CO_2), dans la mesure où il s'agit d'un composé intervenant dans la respiration cellulaire, dissout dans le sang, qui est un indicateur direct de l'effort physique. On quantifie en millimètres de Mercure (mmHg) car on a affaire à une pression partielle dans le sang puisque le CO_2 est un gaz.

²⁰⁸ Notre étude de cas s'appuie en partie sur un cours de biophysique du Pr. Éric Vicaut portant sur les équilibres acido-basiques :

https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Equilibre_acido-basique_Cours_P1_Pr_Vicaut_2011.pdf

La pression partielle de CO_2 dans le sang doit être comprise entre 38 et 42 mmHg donc la pression artérielle en CO_2 notée P_{CO_2} est telle que :

$$P_{\text{CO}_2} = 40 (2 \pm) \text{ mmHg.}$$

Ensuite, on étudie la concentration en bicarbonate avec HCO_3^- telle que :

$$\text{HCO}_3^- = 24 (2 \pm) \text{ mmol/L.}$$

On peut aussi s'intéresser à la concentration en dioxygène (O_2) qui doit s'approcher de 80 à 100 mmHg. Pour relier toutes ces constantes entre elles, on utilise l'équation d'Henderson-Hasselbalch qui relie le pH d'une solution au pK_a ²⁰⁹, les concentrations en HCO_3^- et en CO_2 via la formule :

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]}$$

Cette équation exprime le pH pour une solution d'acide faible où $[\text{HA}]$ exprime la concentration en acide et $[\text{A}^-]$ celle de sa base conjuguée. Pour le mélange d'un acide faible et d'un sel de ce même acide avec une base forte (l'ensemble définit ce qu'on appelle un système tampon) cette relation devient :

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \frac{[\text{SEL}]}{[\text{ACIDE}]}$$

L'équation d'Henderson-Hasselbalch appliquée au système tampon H_2CO_3 , NaHCO_3 s'écrit :

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

H_2CO_3 est un acide faible qui se dissocie dans les solutions neutres ou acides et les ions NaHCO_3 réagissent comme des bases faibles qui captent les ions H^+ . Le pK de l'acide

²⁰⁹ Expression logarithmique de la constante d'acidité K_a telle que : $\text{pK}_a = -\log K_a$.

carbonique (H_2CO_3) est égal à 6,1 à 37 °C. La concentration en bicarbonates plasmatiques (HCO_3^-) est exprimée en mmol/L de plasma. Pour le sang artériel, sa valeur normale est de 24 mmol/L. H_2CO_3 est en équilibre par la réaction d'hydratation moléculaire avec le CO_2 dissout :



Or la concentration en CO_2 détermine de façon proportionnelle la pression partielle de gaz carbonique P_{CO_2} , donc :

$$\text{H}_2\text{CO}_3 = a \times \text{P}_{\text{CO}_2}.$$

Si l'acide carbonique H_2CO_3 est exprimé en mmol/L et la P_{CO_2} en mmHg :

$$a = 0,03 \text{ à } 37 \text{ °C}.$$

La pression P_{CO_2} normale est de 40 mmHg, et $\text{H}_2\text{CO}_3 = 1,2$ mmol/L. L'équation d'Henderson-Hasselbalch devient :

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \frac{[\text{HCO}_3^-]}{a \times \text{P}_{\text{CO}_2}}.$$

À ce moment, le diagramme de Davenport intervient pour permettre d'interpréter des données de pH chez un patient. Le pH est en abscisse, tandis que la concentration en bicarbonates plasmatiques HCO_3^- est en ordonnée. L'équation d'Henderson-Hasselbalch peut être réécrite de la façon suivante :

$$\frac{[\text{HCO}_3^-]}{a \times \text{P}_{\text{CO}_2}} = 10^{(\text{pH}-\text{pK})}.$$

Soit :

$$[\text{HCO}_3^-] = a \times \text{P}_{\text{CO}_2} \times 10^{(\text{pH}-\text{pK})}.$$

En plaçant toutes les données d'un patient sur un tel diagramme, on peut établir le diagnostic des perturbations de son équilibre acido-basique. Le sang est un mélange de deux systèmes tampons :

- le système bicarbonate de sodium/acide carbonique ($\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{NaHCO}_3$) dont l'anion accepteur de H^+ est HCO_3^- ;
- le système protéines/protéinates dont l'anion accepteur de H^+ est noté Prot^- .

La somme de ces anions tampons est noté C' . On a donc :

$$\mathbf{C' = HCO_3^- + Prot^- .}$$

Du fait de la présence du système protéines/protéinates, on sait que HCO_3^- est une fonction linéaire du pH. Si on centre la formule sur la valeur du pH à l'équilibre qui est à 7,4, alors :

$$\mathbf{HCO_3^- = m + s \times (7,40 - pH),}$$

où m désigne la composante métabolique valant 24 mmol/L pour une concentration normale en HCO_3^- dans la mesure où :

$$\mathbf{\text{Si } pH = 7,4 \text{ alors } m = HCO_3^- .}$$

Dans l'équation de la fonction affine :

$$\mathbf{HCO_3^- = m + s \times (7,40 - pH),}$$

m détermine la position de la droite tampon du sang et s la valeur de sa pente.

On peut dès lors compléter le diagramme de Davenport en traçant les isobares de la pression partielle de gaz carbonique P_{CO_2} ainsi que la droite tampon du sang (droite DNE), qu'on détermine en traçant la droite passant par deux points différents de concentrations de pH obtenus à partir d'une concentration en HCO_3^- donnée. On en

déduit que l'état acido-basique normal correspond à l'intersection de l'isobare 40 et de la droite tampon lorsque $m = 24$ mmol/L de la Figure 107 :

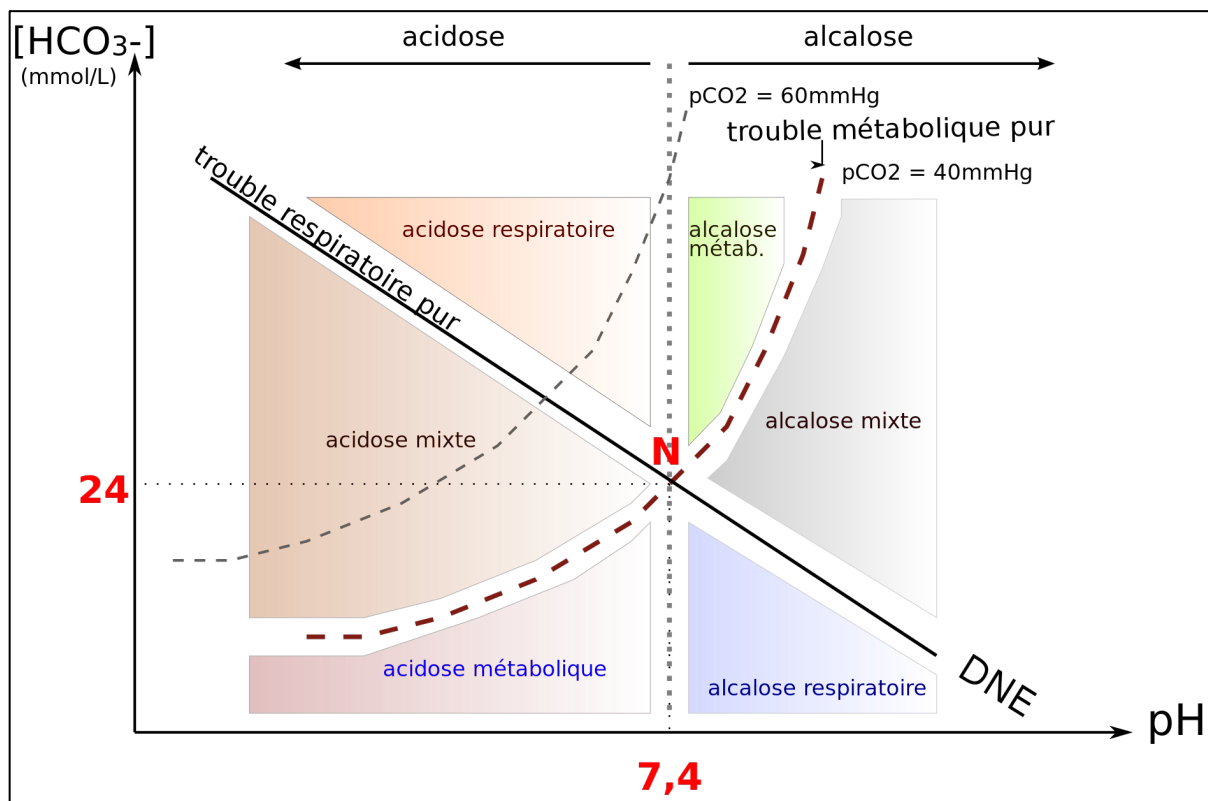


Figure 107 : Diagramme de Davenport²¹⁰

En plaçant les données d'un patient dans ce diagramme, on peut quasiment faire tous les diagnostics médicaux de ses troubles de l'équilibre acido-basique.

²¹⁰https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Davenport#/media/Fichier:Diag_davenport.svg

2. Dessiner des calculs pour faciliter leur pratique

2.1 Les diagrammes de Feynman

2.1.1 Introduction historique

Au milieu des années 1920, les physiciens se demandent comment faire pour décrire des particules relativistes. Comme ces particules sont très rapides, leur cinématique peut être décrite par la théorie de la relativité restreinte. Mais comme elles sont très petites, leur mécanique peut aussi être décrite par la mécanique quantique. Pour décrire une particule quantique qui va très vite, les physiciens sont donc contraints d'inventer un formalisme qui est à la fois quantique et relativiste²¹¹.

Paul Dirac trouve une équation pour décrire le phénomène de collision entre deux particules. Comme on sait depuis Einstein que $E = mc^2$, l'énergie cinétique des particules peut se matérialiser et en faire apparaître de nouvelles. Une particule qui apparaît à l'instant t_0 laisse une trace dans un détecteur et à l'instant t_1 se désintègre en d'autres particules plus légères. Sa durée de vie est donc égale à $t_1 - t_0$. Avec son équation, Dirac décrit ce phénomène. Mais il constate que selon cette équation, qui est donc quantique et relativiste, pour certains observateurs, la chronologie des événements aux instants t_0 et t_1 va être inversée. Cela signifie que certains observateurs verront des particules disparaître avant d'apparaître. Dirac pense alors que son équation est fautive, dans la mesure où la chronologie des événements pour tous les observateurs n'est pas invariante. Dans cette perspective le temps apparaît subjectif, car intégralement dépendant du point de vue de l'observateur. Il semble donc n'avoir aucune réalité objective.

Constatant que son équation outrepassait la causalité, Dirac l'a transformée pour la rendre conforme au principe de causalité, de telle sorte que la chronologie des événements soit invariante, c'est-à-dire que la chronologie $t_0 t_1$ soit la même pour tous les observateurs

²¹¹ É. Klein, « Que savons-nous du temps ? », *Journées X-ENS-UPS de physique*, 11 mai 2006.

(bien que la durée entre t_0 et t_1 puisse être différente d'un observateur à un autre puisque selon la théorie de la relativité cette durée dépend de la vitesse de l'observateur). En ajoutant la causalité comme contrainte dans son équation, Dirac se rend compte que cela conduit à la prédiction d'énergies négatives (qui n'existaient pas quand la causalité n'était pas respectée).

Une particule d'énergie négative est une particule qui, même au repos, continue d'avoir une énergie négative. C'est donc une particule qui a une masse négative. Or en 1931, Dirac a l'idée suivante : d'un point de vue mathématique, une particule d'énergie négative se conduit comme une particule qui remonte le cours du temps. Pour penser l'idée contre-intuitive d'une remontée du cours du temps, Dirac réinterprète mathématiquement une particule d'énergie négative qui remonte le cours du temps comme étant une antiparticule d'énergie positive qui suit le cours du temps. La causalité appliquée comme contrainte dans son équation à la fois quantique et relativiste le conduit alors à la prédiction de l'existence d'une antiparticule : en l'occurrence le positron (ou positon), qui est l'antiparticule de l'électron (de même masse et de charge électrique opposée).

Si la causalité est une loi de la nature, alors le positron doit exister. Soit le positron existe et la causalité est une bonne contrainte (les voyages dans le temps sont alors impossibles) ; soit le positron n'existe pas et alors on tombe dans l'embarras. Dirac publie son article sur la question en 1932 et quelques mois plus tard, le physicien expérimentateur Carl David Anderson découvre une particule qui s'avère être l'antiparticule prédite par Dirac : le positron. Dirac sera lauréat du prix Nobel de physique en 1933 ; Anderson, lauréat du prix Nobel de physique en 1936. Ce résultat sera par la suite généralisé, car nous savons maintenant qu'à toute particule est associée une antiparticule.

Au début des années 1940, les physiciens se trouvent confrontés au problème de l'unification de la mécanique quantique et de la relativité. Dès 1949, Richard Feynman

commence à produire une série d'articles au fondement de l'électrodynamique quantique qui visent à donner une théorie du comportement des électrons et des positrons par une réinterprétation des solutions données par l'équation de Dirac. C'est dans son article « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics », publié en 1949 dans la *Physical Review*, que Feynman expose pour la première fois ce qu'on appelle depuis lors un *diagramme de Feynman* :

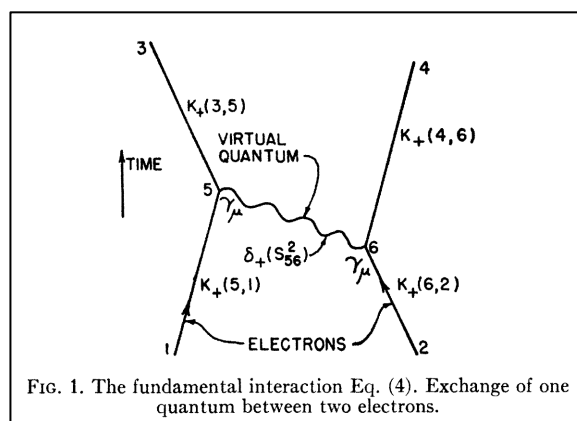


Figure 108 : Premier diagramme de Feynman²¹²

Les diagrammes de Feynman se révèlent être des outils graphiques qui facilitent l'application de la théorie des perturbations en permettant non seulement de visualiser les interactions entre particules mais aussi de réaliser plus directement et plus simplement les calculs qui leurs correspondent.

Un diagramme de Feynman (voir Figure 109) comporte deux axes : l'un horizontal qui représente le déplacement spatial ; l'autre vertical qui représente le passage du temps. Il est en outre constitué de trois types d'éléments suivants :

- des propagateurs de particules réelles ;
- des propagateurs de particules virtuelles ;
- des nœuds appelés vertex.

²¹² R. Feynman, « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics », *Physical Review*, vol. 76, n° 6, American Physical Society, 1949, Figure 1, p. 772.

2.1.2 Principes de fonctionnement de la machinerie des diagrammes de Feynman

Prenons un cas simple²¹³, celui de l'interaction entre deux atomes neutres A et B par échange de photons. Au lieu de raisonner sur le système dans sa globalité, on peut se fixer sur chaque particule et la suivre au cours du temps, en lisant le diagramme du bas vers le haut. Par exemple, les trois facteurs d'évolutions liés à la particule A dans son interaction avec B sont $e^{-iE_e \times \frac{(t_2-t_1)}{\hbar}}$, $e^{-iE_e \times \frac{(t_3-t_2)}{\hbar}}$, $e^{-iE_e \times \frac{(t_4-t_3)}{\hbar}}$, qui apparaissent dans les trois intervalles de temps $t_1 \leftrightarrow t_2$, $t_2 \leftrightarrow t_3$, $t_3 \leftrightarrow t_4$ de la Figure 109. Ils se regroupent en $e^{-iE_e \times \frac{(t_4-t_1)}{\hbar}}$ pour décrire la propagation de A entre t_1 et t_4 :

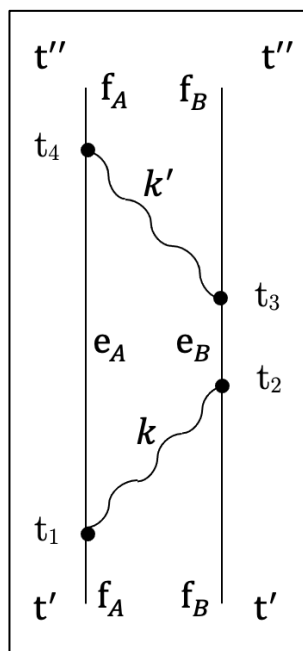


Figure 109 : Diagramme de l'interaction entre deux atomes neutres A et B par échange de photons

²¹³ Nous remercions Jean-Marie Vigoureux pour sa relecture de notre analyse des diagrammes de Feynman, dont l'une des sources est un cours manuscrit de Claude Cohen-Tannoudji daté de 1975, dont il nous a transmis une photocopie.

On peut lire le diagramme de la Figure 109 de la manière suivante, où k est le vecteur d'onde du photon et ε sa polarisation²¹⁴ :

- A se propage librement de \mathbf{t}' à \mathbf{t}_1 , émet un photon $\vec{k}\vec{\varepsilon}$, se propage librement de \mathbf{t}_1 à \mathbf{t}_4 , absorbe un photon $\vec{k}'\vec{\varepsilon}'$, se propage librement de \mathbf{t}_4 à \mathbf{t}'' ;
- B se propage librement de \mathbf{t}' à \mathbf{t}_2 , absorbe un photon $\vec{k}\vec{\varepsilon}$, se propage librement de \mathbf{t}_2 à \mathbf{t}_3 , émet un photon $\vec{k}'\vec{\varepsilon}'$ que va absorber A et se propage librement de \mathbf{t}_3 à \mathbf{t}'' ;
- le photon $\vec{k}\vec{\varepsilon}$ se propage librement de \mathbf{t}_1 à \mathbf{t}_2 entre l'émission par A et l'absorption par B ;
- le photon $\vec{k}'\vec{\varepsilon}'$ se propage librement de \mathbf{t}_3 à \mathbf{t}_4 entre l'émission par B et l'absorption par A .

Ainsi, un diagramme de Feynman se révèle composé de lignes associées à la propagation des diverses particules étudiées (réelles ou virtuelles), qui se rejoignent en un certain nombre de vertex (V_1, V_2, V_3, V_4) décrivant les processus élémentaires d'interaction (voir Figure 110) :

- les lignes entrantes en rouge sont associées aux états initiaux des particules ;
- les lignes sortantes en vert sont associées aux états finaux des particules ;
- les lignes internes en bleu sont associées aux états intermédiaires.

²¹⁴ Pour ne pas surcharger les Figures 109 et 110 nous avons simplifié l'expression des photons par k et k' . Mais $k \equiv \vec{k}\vec{\varepsilon}$ et $k' \equiv \vec{k}'\vec{\varepsilon}'$

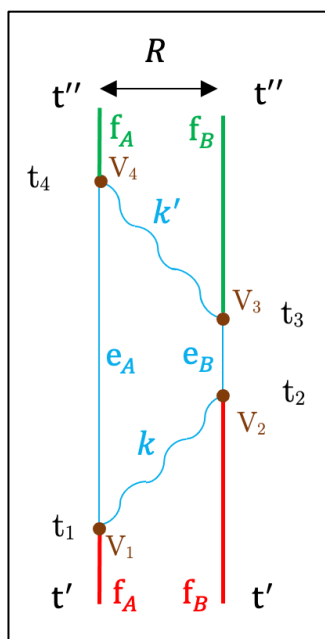


Figure 110 : Diagramme de Feynman de l'interaction entre deux atomes neutres par échange de photons

La particule associée à une ligne interne n'apparaît que de façon transitoire et ne se retrouve ni dans l'état initial ni dans l'état final. La terminologie de l'électrodynamique quantique dit que la particule est *virtuelle*. Un intérêt particulier des diagrammes de Feynman est qu'ils représentent *en eux-mêmes* un calcul puisqu'à chaque élément du diagramme correspond une expression mathématique et qu'il suffit donc après avoir tracé un diagramme d'assembler les expressions mathématiques correspondant à chaque élément pour obtenir pratiquement le résultat cherché, comme le montre Figure 111 :

$$\underbrace{\sum_{i,j} [g_{i,j}(k, R)]^2}_{kk'} \times \underbrace{\frac{\langle f_A \parallel r_A \parallel e_A \rangle \langle e_A \parallel r_A \parallel f_A \rangle}{E_{f_A} - \hbar ck + i\eta - E_{e_A}}}_{f_A} \times \underbrace{\frac{\langle f_B \parallel r_B \parallel e_B \rangle \langle e_B \parallel r_B \parallel f_B \rangle}{E_{f_B} + \hbar ck + i\eta - E_{e_B}}}_{f_B}$$

Figure 111 : Expression analytique des diagrammes de Feynman des Figures 109 et 110

Le premier avantage des diagrammes de Feynman est qu'ils introduisent une succession temporelle de processus physiques bien définis séparés par des phases de

propagation. Leur second et essentiel avantage est qu'ils permettent d'opérer une simplification des calculs algébriques, car en introduisant la notion de propagateur pour chaque système individuel (atome A , atome B , photon), on peut regrouper directement les expressions algébriques correspondant à chaque pièce du diagramme.

2.2 Les diagrammes de Randolph

Les diagrammes d'Euler puis ceux de Venn constituent un moyen d'illustrer « les notions fondamentales de la théorie des ensembles telles que l'inclusion, la complémentation, l'union ou encore l'intersection²¹⁵ ». Ils permettent de se représenter spatialement les relations qu'entretiennent deux ensembles, et de faire sauter aux yeux la façon dont leurs différentes parties sont liées les unes aux autres. Ils peuvent également « être utilisés pour faire des opérations simples impliquant un ou deux ensembles²¹⁶ ». Mais si plus de deux ensembles sont impliqués, ils deviennent rapidement illisibles, comme l'avait déjà constaté Venn lui-même :

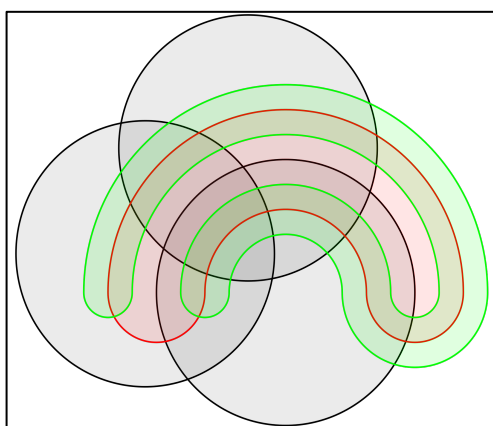


Figure 112 : Diagramme de Venn des relations entre 5 ensembles²¹⁷

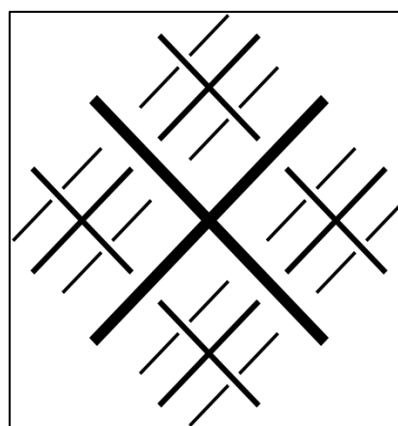


Figure 113 : Représentation équivalente de la Figure 112 au moyen d'un R-diagramme²¹⁸

²¹⁵ J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », Western Kentucky University, Bowling Green, 1970, p. 2. Nous traduisons les passages cités.

²¹⁶ *Ibid.*

²¹⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Venn#/media/Fichier:Venn5.svg

²¹⁸ <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Randolph-diagram-n5.svg>

Les diagrammes de Randolph (R-diagrammes), introduits par John F. Randolph en 1965²¹⁹, offrent une simplification notationnelle des expressions de la théorie des ensembles et/ou de l'algèbre de Boole. Ils ont par ailleurs permis dès les années 1950 à des groupes d'ingénieurs en électricité de simplifier la représentation de circuits de commutation²²⁰.

Soit U l'univers du discours (au sens logique introduit par De Morgan) représenté par un rectangle. Lorsqu'un ensemble A , représenté par un cercle, est introduit à l'intérieur de U , la limite circulaire de A divise U en deux parties disjointes notées 1 et 2. 1 désigne l'ensemble A , tandis que 2 désigne $A' = \text{non } A$:

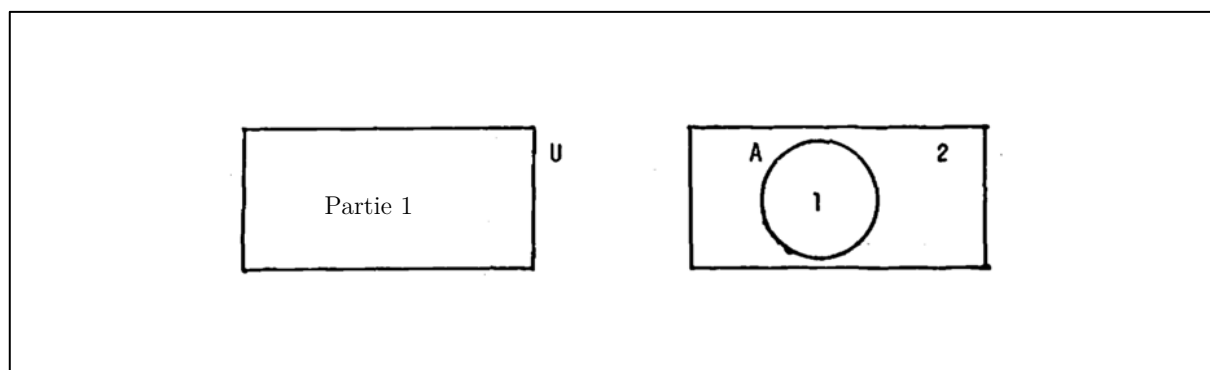


Figure 114 : Division de l'ensemble universel U en deux parties disjointes²²¹

Lorsqu'un second ensemble B , représenté par un second cercle, est introduit à l'intérieur de U , cela divise U en quatre parties disjointes :

²¹⁹ J. F. Randolph, « Cross-Examining Propositional Calculus and Set Operations », *The American Mathematical Monthly*, vol. 72, n° 2, Taylor & Francis, 1965, p. 117-127. Notre présentation des diagrammes de Randolph se fonde sur l'étude suivante : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit.

²²⁰ J. F. Randolph, art. cit., p. 117.

²²¹ Source de la Figure 114 (Figure modifiée) : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., Figures 1 et 2, p. 3.

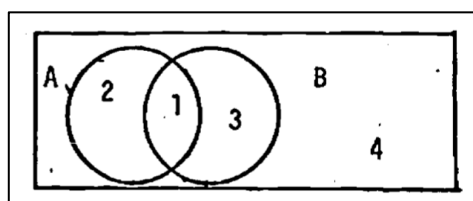


Figure 115 : Division de l'ensemble universel U en quatre parties disjointes²²²

Autrement dit, si n cercles sont introduits dans U , U est alors divisé en 2^n parties disjointes. La stratégie de Randolph consiste à changer de représentation et à diviser U en quatre régions au moyen de deux droites :

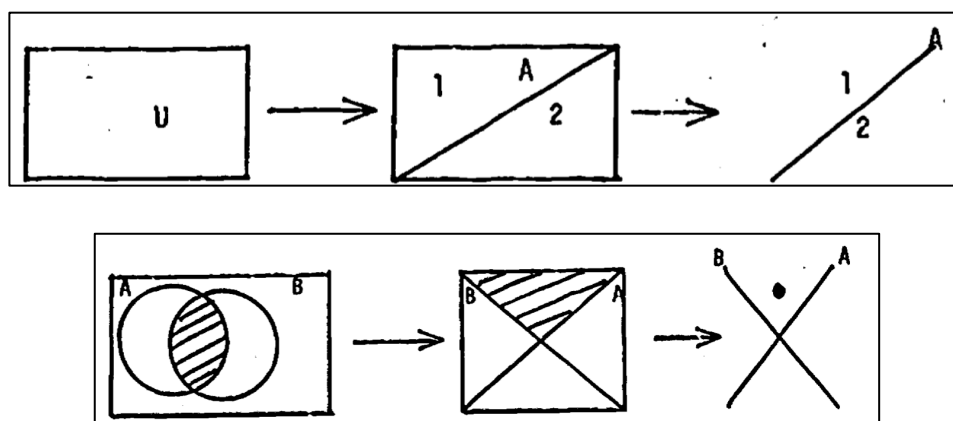


Figure 116 : Première convention graphique de Randolph²²³

Les ensembles A et B sont représentés par des lignes et non plus par des cercles. La zone située au-dessus de B signifie qu'elle est dans B , tandis que celle qui est située au-dessous de B signifie le contraire, à savoir qu'elle n'est pas dans B : on la note B' = non B . La même convention s'applique pour l'ensemble A .

²²² Source de la Figure 115 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., Figure 3, p. 4.

²²³ Source de la Figure 116 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., p. 5.

Si maintenant on représente l'intersection de A et B, d'après les conventions énoncées, la zone d'intersection des ensembles dans une représentation eulérienne (partie hachurée commune aux cercles de A et B) correspond à la partie située au-dessus des lignes qui divisent l'univers du discours en deux ensembles et quatre parties disjointes. La seconde convention de Randolph consiste à substituer au hachurage de la zone d'intersection le placement d'un point dans la zone située au-dessus de A et B :

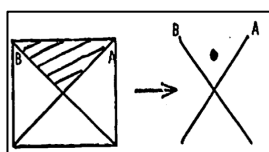


Figure 117 : Deuxième convention graphique de Randolph²²⁴

D'après la subdivision en zones 1, 2, 3 et 4 induite par l'introduction des ensembles A et B, on obtient donc la représentation suivante :

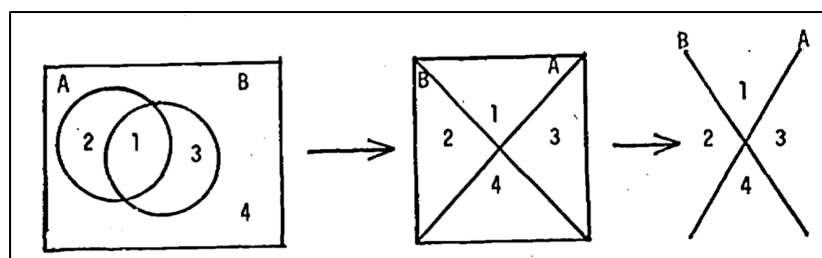


Figure 118 : Séquence de traduction d'un diagramme de Venn en R-diagramme²²⁵

Règle 1 : « pour compléter un R-diagramme, il faut inverser les rôles des points et des zones blanches dans le diagramme²²⁶ ». D'après ce que nous venons d'énoncer, l'union $A \cup B$ se représente de la façon suivante :

²²⁴ Source de la Figure 117 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., p. 6.

²²⁵ Source de la Figure 118 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., p. 6.

²²⁶ J. B. Barksdale, art. cit., p. 9.

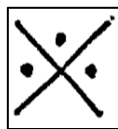


Figure 119 : R-diagramme de l'union $A \cup B$

Par conséquent $(A \cup B)'$ est telle que :

$$(A \cup B)' = \left(\begin{array}{c} \cdot \\ \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array} \right)' = \begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array} = A' \cap B' .$$

Figure 120 : R-diagramme de l'union $(A \cup B)'$

Règle 2 : « pour unir deux ou plusieurs R-diagrammes, il faut écrire un R-diagramme dont le point se trouve exactement aux endroits où au moins un des diagrammes de l'union a un point²²⁷ ». Par exemple :

$$A' \cup B \cup (A \cap B) = \begin{array}{c} \cdot \\ \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array} \cup \begin{array}{c} \cdot \\ \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array} \cup \begin{array}{c} \cdot \\ \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array} = \begin{array}{c} \cdot \\ \diagdown \quad \diagup \\ \cdot \end{array}$$

Figure 121 : Traduction de $A' \cup B \cup (A \cap B)$ sous forme d'un R-diagramme²²⁸

Règle 3 : « pour intersecter deux ou plusieurs R-diagrammes, il faut écrire un R-diagramme qui a des points uniquement aux endroits où tous les diagrammes ont un point²²⁹ ». Par exemple :

²²⁷ J. B. Barksdale, art. cit., p. 9.

²²⁸ Source de la Figure 121 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., p. 9.

²²⁹ J. B. Barksdale, art. cit., p. 9-10.

$$(A \cap B) \cap (A' \cup B') = \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \cap \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} = \begin{array}{c} \times \\ \times \end{array} = \emptyset .$$

Figure 122 : Règle d'intersection de R-diagrammes

Règle 4 : « soit $R(S)$ le R-diagramme pour l'ensemble S . Quand $A \subseteq B$, alors pour chaque point dans $R(A)$, il y a un point correspondant dans $R(B)$ ²³⁰ ».

Règle 5 : « deux ensembles sont égaux lorsqu'ils ont le même R-diagramme²³¹ ».

L'application de ces règles permet ainsi de faciliter et d'accélérer les calculs opérés sur des ensembles. Par exemple :

$$\begin{aligned} [(A \cap B)' \cap (A' \cup B)'] \cup A &= \left[\left(\begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \right)' \cap \left(\begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \right)' \right] \cup \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \\ &= \left[\begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \cap \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \right] \cup \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \\ &= \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \cup \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} \\ &= \begin{array}{c} \times \\ \cdot \end{array} = A . \end{aligned}$$

Figure 123 : Exemple de simplification calculatoire au moyen de R-diagrammes²³²

²³⁰ B. Barksdale, art. cit., p. 10.

²³¹ *Id.*

²³² Source de la Figure 123 : J. B. Barksdale, « Sets and Randolph Diagrams », art. cit., p. 12.

Tableau des opérations logiques de base






Nom	Symbole	R-diagramme	Table de vérité															
Négation	\neg		<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>$\neg p$</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>V</td> </tr> </table>	p	$\neg p$	V	F	F	V									
p	$\neg p$																	
V	F																	
F	V																	
Conjonction	\wedge		<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>q</td> <td>$p \wedge q$</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>F</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>V</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>F</td> <td>F</td> </tr> </table>	p	q	$p \wedge q$	V	V	V	V	F	F	F	V	F	F	F	F
p	q	$p \wedge q$																
V	V	V																
V	F	F																
F	V	F																
F	F	F																
Disjonction	\vee		<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>q</td> <td>$p \vee q$</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>F</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>F</td> <td>F</td> </tr> </table>	p	q	$p \vee q$	V	V	V	V	F	V	F	V	V	F	F	F
p	q	$p \vee q$																
V	V	V																
V	F	V																
F	V	V																
F	F	F																
Implication matérielle	\rightarrow		<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>q</td> <td>$p \rightarrow q$</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>F</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>F</td> <td>V</td> </tr> </table>	p	q	$p \rightarrow q$	V	V	V	V	F	F	F	V	V	F	F	V
p	q	$p \rightarrow q$																
V	V	V																
V	F	F																
F	V	V																
F	F	V																
Biconditionnelle	\leftrightarrow		<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>q</td> <td>$p \leftrightarrow q$</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>V</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>V</td> <td>F</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>V</td> <td>F</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>F</td> <td>V</td> </tr> </table>	p	q	$p \leftrightarrow q$	V	V	V	V	F	F	F	V	F	F	F	V
p	q	$p \leftrightarrow q$																
V	V	V																
V	F	F																
F	V	F																
F	F	V																

Figure 124 : Tableau des opérations logiques de base

Le tableau des opérations logiques de base nous permet de comprendre comment les R-diagrammes permettent en outre de simplifier les expressions logiques. En effet l'expression logique suivante :

$$(Q \leftrightarrow P) \vee (\neg P \wedge),$$

peut être simplifiée de la façon suivante :

$$\left(\begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \end{array} \leftrightarrow \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \end{array} \right) \vee \left(\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \end{array} \wedge \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \end{array} \right) = \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \end{array} \wedge \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \end{array}. \quad (6.1)$$

$$\begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \end{array} \wedge \begin{array}{c} \bullet \\ \diagup \quad \diagdown \\ \bullet \end{array} = \begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \end{array}. \quad (6.2)$$

$$\begin{array}{c} \bullet \\ \diagdown \quad \diagup \\ \bullet \quad \bullet \end{array} = P \rightarrow Q. \quad (6.3)$$

On en déduit donc que :

$$(Q \leftrightarrow P) \vee (\neg P \wedge Q) = P \rightarrow Q. \quad (6.4)$$

3. Comprendre des machines thermodynamiques

3.1 Le diagramme de Clapeyron

Il est parfois important de savoir quelle est la fraction massique en liquide et en gaz du fluide qui fait marcher une machine thermodynamique. Pour ce faire, on peut utiliser un diagramme de Clapeyron, qui permet de déterminer la pression en fonction du volume massique d'un corps pur pouvant se trouver sous deux phases, gazeuse et liquide. On obtient ce diagramme en traçant un repère orthonormé dans lequel la pression P est en ordonnée et le volume V (ou le volume massique V_m) en abscisse. Si on met un fluide caloporteur à une température initiale T_1 et qu'on le comprime légèrement, le volume et le volume massique vont diminuer. À partir d'une certaine pression $P_{vs, 1}$, il y a apparition d'une première goutte liquide :

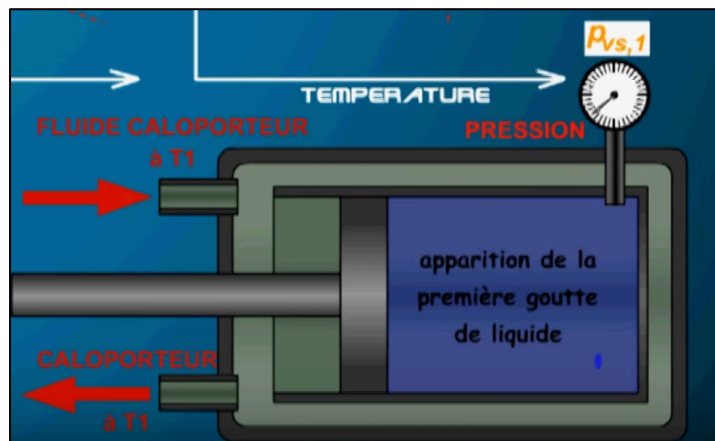


Figure 125 : Schéma d'un compresseur²³³

En continuant à comprimer tout en restant à pression constante, on observe de plus en plus de liquide mais la pression à l'intérieur de l'enceinte est égale à la pression maximale à cette température T_1 (pression de vapeur saturante). En continuant à comprimer, le volume

²³³ <https://www.youtube.com/watch?v=m8E0uzl7o9M>

diminue et on finit par arriver à la dernière bulle de vapeur. Tout ce qui est contenu dans l'enceinte est quasiment sous forme liquide. La pression augmente alors brutalement. Le liquide étant dès lors quasi incompressible, si on continue à augmenter la pression, le volume diminue très peu.

La courbe du diagramme de Clapeyron associée à l'évolution de ce processus à une température constante donnée est appelée une *isotherme d'Andrews*. C'est par exemple le cas de la courbe du diagramme de la Figure 126 où la température T est inférieure à la température critique T_c , c'est-à-dire où $T < T_c$:

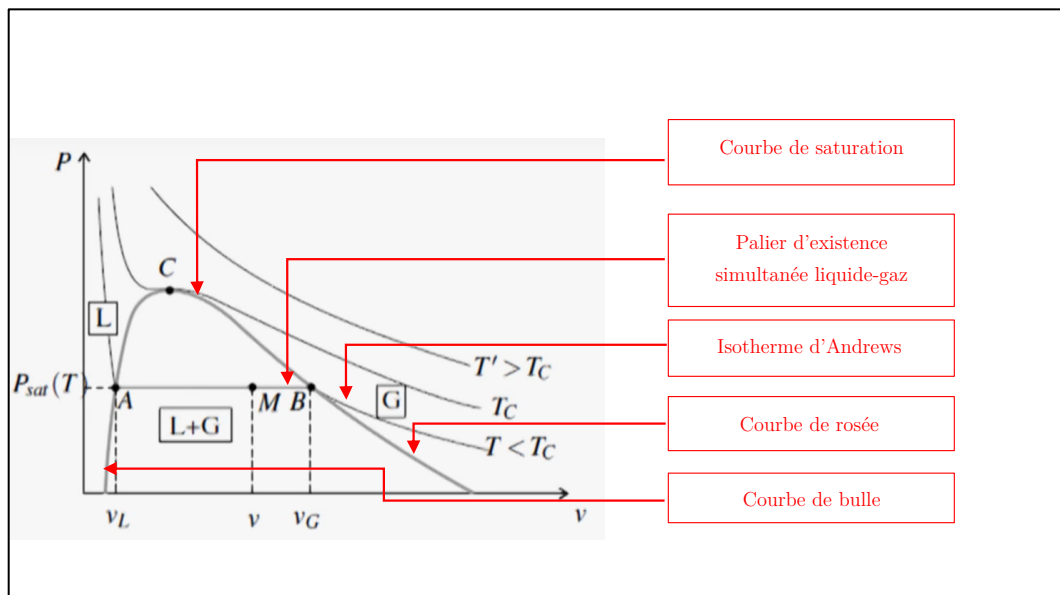


Figure 126 : Diagramme de Clapeyron

Les points A et B aux extrémités d'un palier d'une isotherme d'Andrews correspondent aux points d'existence simultanée de liquide et de gaz. Tous les points A et B aux extrémités de ces paliers forment une courbe de saturation, qui délimite le domaine d'existence simultanée de liquide et de gaz. La partie de la courbe de saturation située à gauche du point critique C s'appelle la courbe d'ébullition ou courbe de bulle. Si à partir du point A on augmente le volume massique de l'enceinte, on obtient une première bulle, c'est-à-dire le

corps pur sous forme gazeuse. C'est pourquoi A est appelé le point de bulle. En effet à la température T le corps pur est sous forme gazeuse jusqu'au point B , et à partir du point B , on commence à voir apparaître une première goutte de liquide. C'est pourquoi la partie à droite de C est nommée la courbe de rosée et le point B , le point de rosée.

3.2 Le diagramme enthalpique

3.2.1 Présentation du diagramme enthalpique

Le diagramme enthalpique permet de faire des calculs pour choisir et dimensionner les éléments d'une machine frigorifique et mieux comprendre le cycle frigorifique. Chaque fluide frigorifique possède son diagramme enthalpique. Sur l'axe des ordonnées, le diagramme indique la valeur de la pression absolue mesurée en bar. Sur l'axe des abscisses, il indique celle de l'enthalpie, mesurée en kilojoule par kilogramme (kJ/kg). L'enthalpie représente l'énergie totale emmagasinée pour 1 kg de fluide, pour une pression et une température toutes deux données. La courbe de saturation divise en trois parties le diagramme : à gauche l'état liquide, à droite l'état gazeux, à l'intérieur de l'aire sous la courbe le mélange liquide plus vapeur. Au sommet de la courbe de saturation se situe le point critique, au-dessus duquel aucun changement d'état n'est possible. Une première courbe de couleur bleu ciel, l'isobare, représente la pression constante et absolue en bar (voir Figure 127). C'est une ligne horizontale perpendiculaire à l'axe des ordonnées : elle donne des valeurs pour une pression constante. Le ligne de l'isotherme, de couleur marron foncé, représente le tracé de la température. Dans la zone liquide c'est une ligne verticale ; dans la zone de mélange liquide plus vapeur, c'est une ligne horizontale (dans cette zone isotherme et isobare se confondent) ; dans la zone vapeur surchauffée, c'est une courbe. L'isenthalpe, la courbe marron clair du diagramme, représente l'évolution de l'enthalpie, soit l'énergie totale du système thermodynamique : elle s'exprime en kJ/kg. L'isotitre, la ligne signalée par des

points de couleur bleu (à gauche sous la courbe de saturation), représente le pourcentage de vapeur par rapport à la masse totale de liquide : plus cette courbe est déplacée vers la droite, plus la proportion de vapeur est grande. La ligne pointillée verte, l'isochore, représente le volume massique par kilogramme de fluide frigorigène (l'unité est le m^3/kg) : elle traverse la zone de mélange et la zone de vapeur. Enfin l'isentrope, de couleur violet, est la courbe caractéristique de la compression : elle mesure l'entropie interne emmagasinée en kilojoule pour un kilogramme de fluide frigorigène par Kelvin (entropie massique).

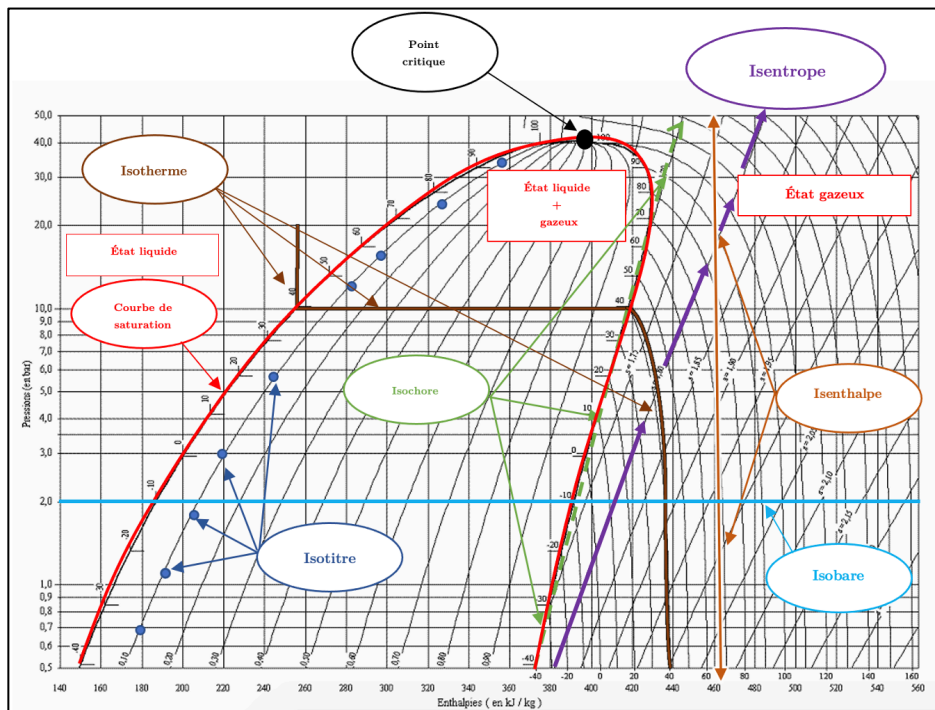


Figure 127 : Description du diagramme enthalpique²³⁴

3.2.2 Analyse d'un exemple : le diagramme enthalpique de R-134a

Si on s'intéresse à un climatiseur, on peut essayer de déterminer son efficacité en étudiant les propriétés du fluide qui est utilisé dans la climatisation grâce à un diagramme enthalpique. Pour refroidir l'intérieur d'un véhicule, un fluide frigorigère,

²³⁴ Source de la Figure 127 : <https://beos.prepas.org/sites/default/files/4710/1531309349/r134a.gif> (Figure modifiée)

l'hydrofluorocarbone R-134a, effectue en continu des transferts d'énergie entre l'intérieur du véhicule, l'extérieur du véhicule et le compresseur. La structure du climatiseur est la suivante :

- l'intérieur du véhicule à refroidir, qui est une source froide, échange de l'énergie avec le fluide en circulation dans le climatiseur au niveau d'un premier composant, l'évaporateur ;
- le compresseur, deuxième élément du climatiseur, permet de donner au fluide un travail ;
- une deuxième source, chaude cette fois-ci, le condenseur, permet d'échanger un transfert thermique avec le fluide de la pompe à chaleur ;
- le détendeur enfin qui sert à baisser la pression du fluide.

Le condenseur et l'évaporateur sont deux échangeurs thermiques qui permettent au fluide d'opérer un transfert thermique soit avec l'intérieur, soit avec l'extérieur :

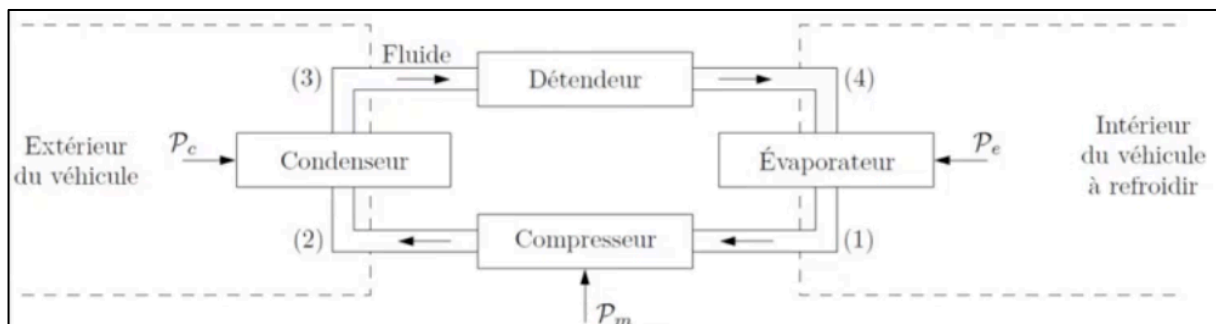


Figure 128 : Schéma d'un climatiseur²³⁵

Comme dans le diagramme de Clapeyron, en-dessous de la cloche on est dans un équilibre liquide/vapeur, à droite on est dans un état gazeux, à gauche, dans un état liquide. Chaque point du diagramme enthalpique correspond à un certain état du fluide. Les lignes

²³⁵ Source de la Figure 128 : https://www.youtube.com/watch?v=GaQA_5K27nI

d'entropie massique sont données en kJ/K/kg. Dans le cas étudié, on raisonne sur une entropie massique $S_1 = 1,75$ kJ/K/kg. Les lignes situées à l'intérieur de la courbe en cloche donnent la fraction massique de vapeur dans l'équilibre liquide/vapeur.

Une des propriétés importantes d'un gaz parfait est la deuxième loi de Joule selon laquelle pour un gaz parfait la variation d'enthalpie massique est égale à la capacité thermique massique à pression constante multipliée par la variation de température :

$$\Delta h = C_p \cdot \Delta t$$

Autrement dit si h est constant, t est constant. Si l'un des deux paramètres ne varie pas, l'autre ne varie pas. Cela signifie que si le gaz est parfait et qu'on se situe à enthalpie constante, on se situe aussi à température constante. Comme l'enthalpie est représentée sur l'axe des ordonnées, cela signifie que les lignes droites de la zone d'état gazeux, lorsqu'on a affaire à un gaz parfait, doivent aussi être des lignes à température constante : quand les isothermes sont confondues avec les isenthalpes, c'est donc qu'on a affaire à un gaz parfait.

Quand le fluide entre dans le compresseur, il est dans un état 1, quand il en sort il est dans un état 2. Si le rapport R des pressions P_1 et P_2 en entrée et en sortie du compresseur est de 6 bars, c'est-à-dire si :

$$R = P_2/P_1 = 6,$$

et si le compresseur est isentropique, c'est-à-dire qu'on le suppose fonctionner de manière réversible et qu'on néglige tout frottement à l'intérieur de ce dernier, et si on suppose que les parois sont adiabatiques et donc ne produisent pas d'échange thermique avec l'extérieur, on est donc situé dans un modèle de compresseur réversible. Peut-on représenter la sortie du compresseur sur le diagramme ?

Comme la compression subie est isentropique, on doit donc suivre sur le diagramme la ligne d'entropie qui part du point de l'état 1 dans lequel la pression est de 3 bars et la

température à 5°C puis remonter jusqu'à la ligne horizontale de l'état 2 à 18 bars. Cela permet de trouver le point de l'état 2 dans lequel se trouve le fluide, grâce au point d'intersection de la ligne isentrope partant du point de l'état 1 et de la ligne isobare à 18 bars sur le diagramme de la Figure 129 :

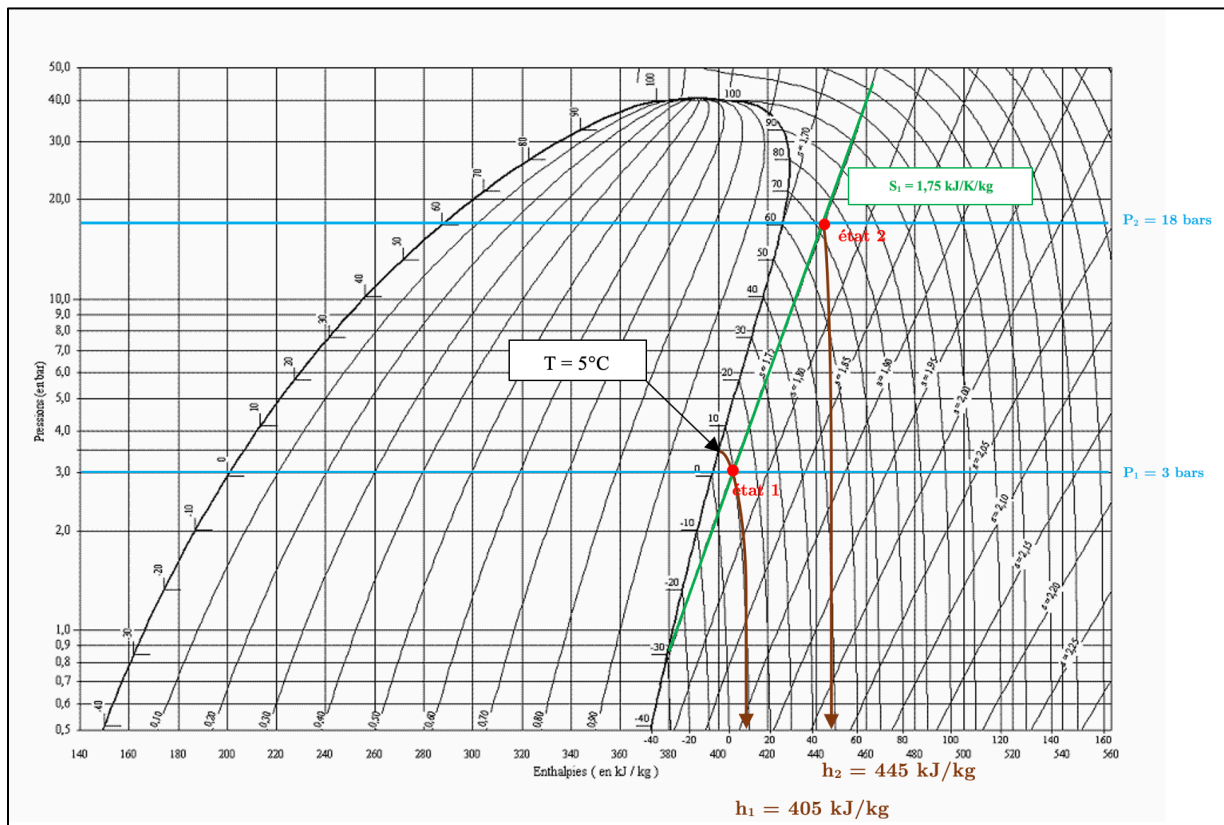


Figure 129 : Diagramme enthalpique de R-134a

En projetant ce point d'intersection sur l'axe des abscisses, on trouve 445 kJ/kg, ce qui permet de calculer la variation d'entropie massique Δh au cours du passage du fluide dans le compresseur qui est donnée par la relation : $\Delta h_{1,2} = h_2 - h_1 = 40$ kJ/kg.

4 Machiner la théorie : le diagramme de Darwin

Darwin a proposé en 1859 un récit scientifique pour rendre compte de l'origine de toutes les espèces. Il voulait que ses recherches « éclairent » (*throw light*) la formation de la vie²³⁶. Or mettre en lumière quelque chose, c'est précisément l'illustrer pour l'éclairer. Dans son ouvrage, Darwin ne se contente pas de raconter l'histoire de l'évolution, il l'illustre par un diagramme arborescent dont l'ambition théorique est très forte, et sur lequel il a réfléchi pendant plus de vingt ans puisque la première esquisse remonte au *Carnet B* de 1837-1838²³⁷. L'arbre de la vie présenté au chapitre 4 de *L'Origine des espèces* s'abstrait du récit, pour présenter dans l'espace d'une page un diagramme qui expose les principes et les hypothèses de sa théorie de la sélection naturelle.

Nous pensons qu'il est pertinent de proposer une analyse du diagramme de Darwin pour deux raisons. D'une part parce qu'il s'agit d'un diagramme qui est très célèbre dans l'histoire des sciences ; d'autre part parce qu'il s'agit d'un exemple tout à fait instructif où l'on voit s'articuler un processus de morphogenèse à la représentation diagrammatique d'une théorie scientifique complexe : la théorie de l'évolution. Ce diagramme permet ainsi de visualiser le processus de morphogenèse des espèces vivantes d'un point de vue macro-évolutif, c'est-à-dire à l'échelle de la Nature saisie comme un tout, et il facilite la compréhension d'une théorie scientifique complexe qu'il résume dans l'espace d'une feuille de papier. Il représente donc le symbole d'une thèse que nous entendons défendre, selon laquelle *il y a une communauté de forme intelligible entre un processus de morphogenèse dans la nature et sa représentation diagrammatique, qui en permet non seulement l'intuition, mais aussi la compréhension dans un espace sémiotique de présentation et d'expression*. Avant de

²³⁶ C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*. 1st ed., Ch. 14, Conclusion, §2, John Murray, London, 1859, p. 488.

²³⁷ C. Darwin, *Le corail de la vie. Carnet B (1837-1838)*, Paris, Payot & Rivages, 2008, p. 56.

procéder à l'analyse technique du diagramme, nous présentons les vicissitudes qui ont conduit Darwin à lui donner sa forme définitive dans *L'Origine des espèces*.

4.1 La genèse du diagramme de Darwin

Notre propos consistera, à partir de l'enquête menée par l'historien de l'art et philosophe allemand Horst Bredekamp²³⁸, à décrire la genèse historique et manuscrite qui a conduit Darwin, entre 1837 et 1859, à réaliser dans le chapitre 4 de *L'Origine des espèces* ce qu'il a nommé dans une lettre au géologue Charles Lyell, datée du 2 septembre 1859, son « étrange diagramme²³⁹ » (*queer diagram*), qui est à ce jour l'une des images les plus marquantes de l'histoire de la science naturelle.

Entre 1831 et 1836, Darwin a participé à une mission au bord d'un navire, le célèbre *Beagle*, pour améliorer la cartographie des côtes de l'Amérique du Sud. De cette longue expédition, il a ramené un grand nombre de spécimens, dont un exemplaire de l'espèce corallienne actuellement connue sous le nom de *Bossea Orbignyana* (Figure 130).

²³⁸ H. Bredekamp, *Les coraux de Darwin: premiers modèles de l'évolution et tradition de l'histoire naturelle*, Dijon, Presses du réel, 2008.

²³⁹ T. Hoquet, *Darwin contre Darwin : comment lire "L'origine des espèces"?*, Paris, Seuil, 2009, p. 123.



Figure 130 : Charles Darwin, *Amphiroa Orbignyana*, 1770, Londres, The Natural History Museum²⁴⁰

La thèse de Bredekamp est que *Bossea Orbignyana* est le paradigme de la représentation diagrammatique de la théorie de l'évolution telle qu'on peut la voir sur la planche de *L'Origine des espèces*.

Dans le premier diagramme de 1837, l'évolution de la nature possède pour la première fois une forme visuelle. Dans le folio 26 du *Carnet B*, Darwin écrit que « l'arbre de la vie devrait plutôt être appelé le corail de la vie²⁴¹ ». Les lignes pointillées renvoient aux espèces éteintes, tandis que les lignes continues désignent les espèces encore vivantes. C'est la critique de la théorie transformiste soutenue par Jean-Baptiste Lamarck qui conduit Darwin à recourir au modèle de l'arbre et lui permet dans un premier temps d'exprimer la tendance

²⁴⁰ Source de l'image de la Figure 130 : <https://www.flickr.com/photos/gosesomer/4862083725>

²⁴¹ Darwin écrit : « The tree of life should perhaps be called the coral of life. » Source : Bibliothèque universitaire, Cambridge, Notebook B (DAR 121), folio 26. URL: <https://images.lib.cam.ac.uk/content/images/MS-DAR-00121-000-00015.jpg>

des espèces à se séparer les unes des autres. Même s'il est radicalement en désaccord avec la théorie transformiste, Darwin tire de la *Philosophie zoologique* (1809), qui contient un tableau où les animaux sont reliés entre eux, les lignes pointillées (*dotted lines*) comme éléments essentiels de ses futures esquisses de diagrammes évolutionnaires²⁴².

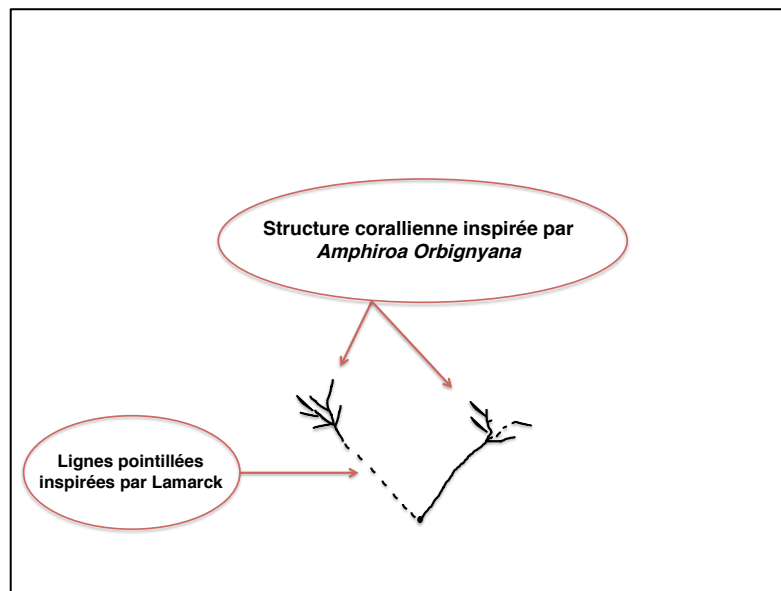


Figure 131 : Analyse d'une reproduction schématique de la première esquisse du diagramme de Darwin (1837) tirée du Carnet B, folio 26

Selon Bredekamp, le diagramme de *L'Origine des espèces*, plus connu sous le nom d'« arbre de la vie » (*Tree of Life*), a puisé les principes de son organisation dans les modèles de deux de ses contemporains, tous les deux zoologues et géologues : Hugh E. Strickland (1811-1853) et Louis Agassiz (1807-1873). De Strickland, Darwin retient la critique des métaphores de l'échelle et de la chaîne des êtres vivants héritées du Moyen Âge, la première en ce qu'elle implique une hiérarchie entre les espèces, la seconde « en ce que chaque espèce n'a qu'un voisin de part et d'autre de son chaînon²⁴³ ». En remettant en cause l'idée d'une

²⁴² Bredekamp, *op. cit.*, p. 26.

²⁴³ *Ibid*, p. 50.

échelle de la nature (*scala naturae*), c'est l'idée d'un plan divin qui est atteinte, mais aussi celle d'une création achevée ayant assigné à chaque espèce une place déterminée dans l'ordre de la création divine.

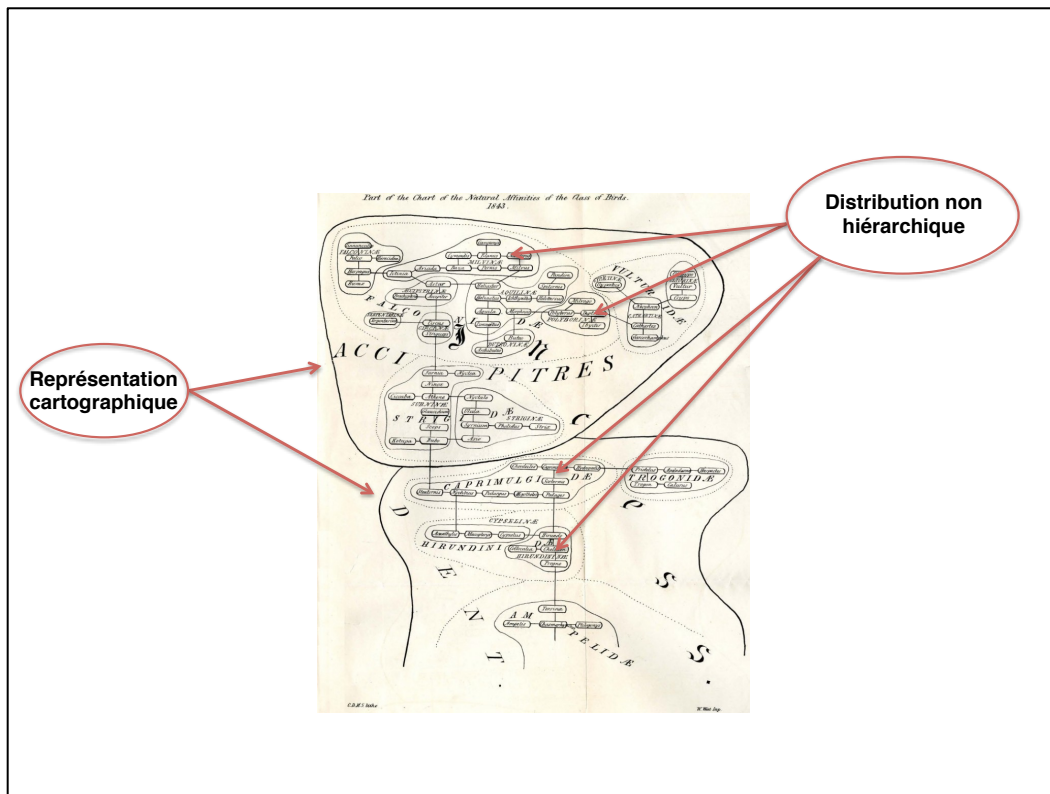


Figure 132 : Description de la « Carte des affinités naturelles de la classes des oiseaux » (*Chart of the Natural Affinities of the Class of Birds*) de Hugh E. Strickland (1843)²⁴⁴

Comme Darwin, Strickland part du modèle de l'arbre, tout en critiquant sa hiérarchie entre tronc, branche et rameau, pour intégrer non seulement le caractère anarchique de la puissance créatrice de la Nature, mais aussi la distribution irrégulière des espèces vivantes. La conclusion méthodologique de Strickland est la suivante : on ne peut pas atteindre les

²⁴⁴ Source de l'image de la Figure 132 (Figure modifiée) :

<http://www.marypwinsor.com/wp-content/uploads/2014/01/JardineCopyStricklandTop.jpg>

principes d'ordonnement des faits naturels, mais seulement procéder à une représentation cartographique des espèces vivantes afin de visualiser leurs affinités²⁴⁵ (Figure 132). Ce qui distingue cependant les diagrammes de l'un et l'autre, c'est l'intégration de la dynamique temporelle, absente dans le travail de Strickland, mais présente dans celui de Darwin, ce qui est d'ailleurs la force du modèle corallien qui inspire les premières esquisses darwiniennes.

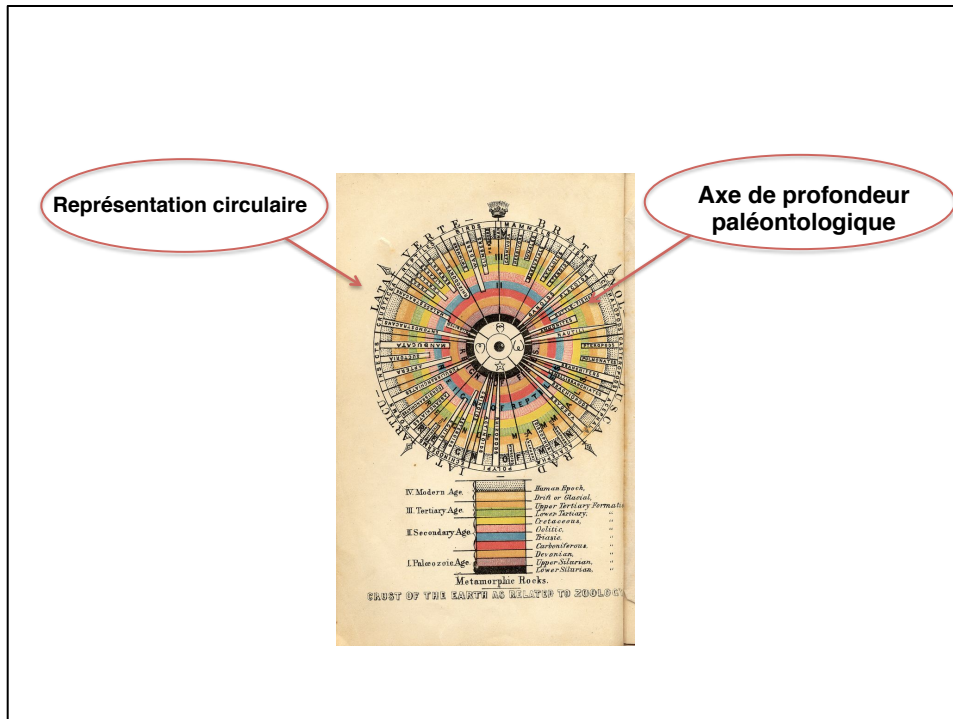


Figure 133 : Description du frontispice des *Outlines of Comparative Physiology* de J. L. R. Agassiz (1851)²⁴⁶

Darwin s'est aussi inspiré du système de représentation circulaire tiré des *Outlines of Comparative Physiology* d'Agassiz (Figure 133), en le déclinant sous forme d'un système en éventail composé de lignes et de points²⁴⁷. Entre 1851 et 1857, il esquisse une série de trois

²⁴⁵ Bredekamp, *op. cit.*, p. 54.

²⁴⁶ Source de l'image de la Figure 133 : <https://www.flickr.com/photos/apsmuseum/2784403178>

²⁴⁷ Bredekamp, *op. cit.*, p. 62.

nouveaux diagrammes à structure corallienne pour intégrer la dimension temporelle de la théorie de l'évolution²⁴⁸. Mais en 1858, il doit mettre fin à ses tentatives pour ne pas perdre la paternité de ses recherches, suite à la publication des travaux d'Alfred Russell Wallace (1823-1913), en particulier un article de 1855, dans lequel il réintroduit le modèle de l'arbre pour figurer les espèces vivantes et leur évolution²⁴⁹. Par crainte de perdre la paternité de la formulation théorique de l'évolution, Darwin reprend le modèle de l'arbre pour le faire passer pour son invention²⁵⁰. C'est donc dans un contexte de conflit intellectuel que Darwin réhabilite cette image de l'évolution.

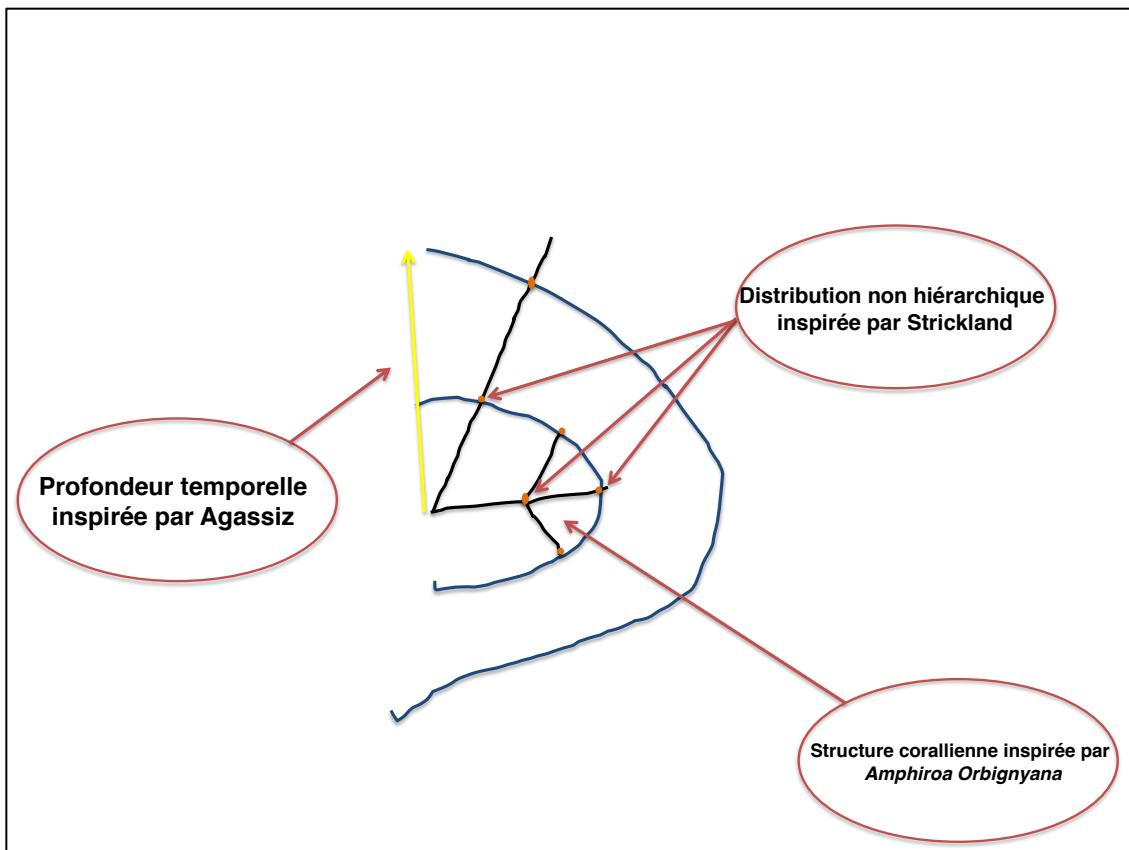


Figure 134 : Description de la structure des esquisses de Darwin (1851-1857)

²⁴⁸ Bredekamp, *op. cit.*, p. 59.

²⁴⁹ *Ibid.*, p. 70-71.

²⁵⁰ *Ibid.*, p. 75.

Bredekamp a remarqué que cette contradiction s'exprime dans *L'Origine des espèces*, car dès que Darwin décrit son diagramme, il tait la métaphore de l'arbre ; et dès qu'il la file, il n'en dit plus un mot²⁵¹. De plus, c'est un argument relatif à la visualisation de l'héritage fossile qui permet d'étayer la thèse d'une origine corallienne du diagramme, car les restes des espèces fossilisées ne forment pas un terreau à la base d'un arbre, mais un système de branches pétrifiées, comme les squelettes calcaires des polypiers. Par conséquent, le branchage géométrique du diagramme ne renvoie pas aux branches d'un arbre, mais aux bras d'un corail²⁵². La preuve qu'il ne s'agit pas d'une simple analogie verbale, c'est que l'on peut superposer le spécimen ramassé en 1834 en Argentine par Darwin (puis ramené en Angleterre à la fin de son voyage) au bras droit du diagramme final de 1859, celui issu de l'espèce *I*, qui s'étend de la ligne III à la ligne X (voir Figure 136). Le diagramme de Darwin apparaît comme le cryptogramme inconscient d'un souvenir oublié (Figure 135).

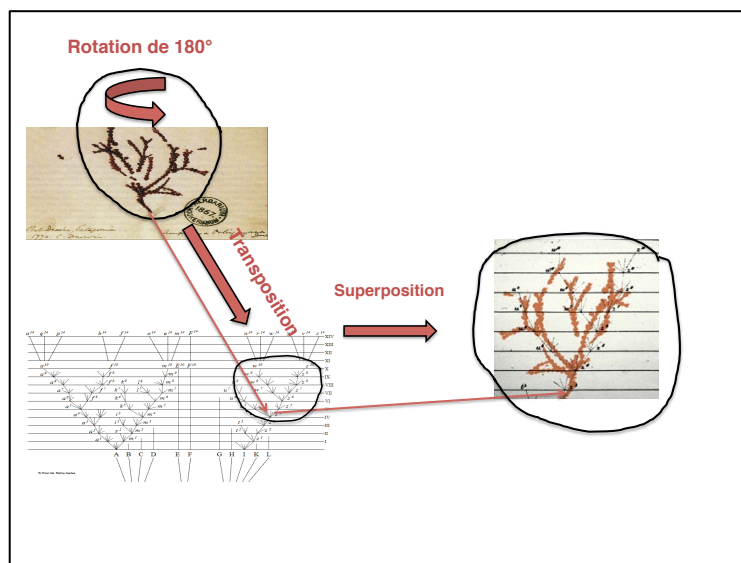


Figure 135 : Le diagramme comme cryptogramme : figuration de la thèse de Bredekamp à propos du diagramme de Darwin

²⁵¹ Bredekamp, *op. cit.*, p. 95.

²⁵² *Ibid.*, p. 99.

L'Origine des espèces, qui ne représente d'ailleurs qu'une forme abrégée d'un manuscrit rédigé entre 1856 et 1858 sur « La sélection naturelle », est un livre volumineux²⁵³. Sans le diagramme, le lecteur ne pourrait pas se faire une représentation globale du processus de la sélection naturelle. Du diagramme original de l'évolution en quatre parties, conservé aux archives Darwin de l'université de Cambridge, il ne reste dans la version publiée qu'un seul schéma, à propos duquel le naturaliste ne laisse aucun doute sur le fait qu'il faut y voir le symbole non seulement de son œuvre, mais aussi de la Nature saisie comme un tout²⁵⁴.

4.2 Analyse du diagramme de *L'Origine des espèces* (1859)

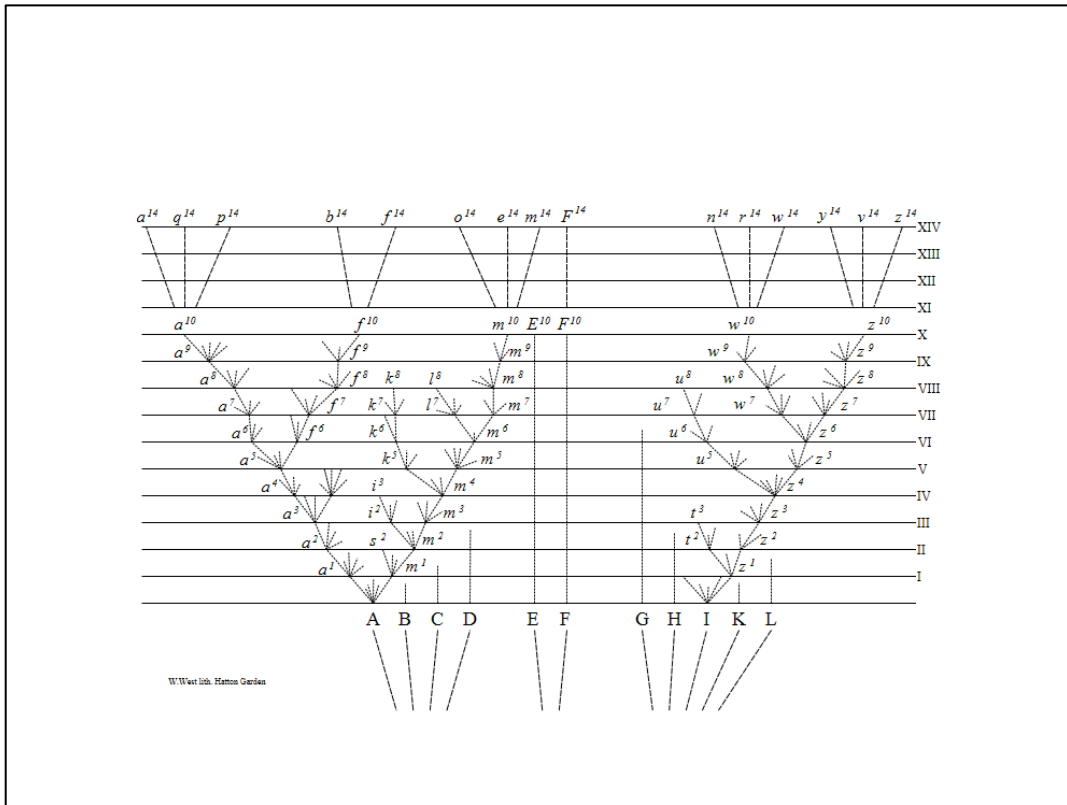


Figure 136 : Version finale du diagramme de Darwin (1859)²⁵⁵

²⁵³ Bredekamp, *op. cit.*, p. 74.

²⁵⁴ *Ibid.* p. 91.

²⁵⁵ Source de l'image de la Figure 136 : https://www.age-of-the-sage.org/evolution/charles_darwin/tree-of-life-origin_of_species-1859.html

À travers l'analyse du diagramme de Darwin, nous visons à montrer en quoi il s'agit d'un type de représentation qu'on ne peut pas réduire à un schéma pédagogique ou une image illustrative, dans la mesure où il s'agit d'un modèle théorique qui fonctionne comme une machine graphique²⁵⁶. Le diagramme de Darwin est une représentation graphique unique parce qu'il s'agit de la seule représentation non linguistique utilisée dans *L'Origine des espèces* : elle est introduite et commentée au chapitre 4, puis réinterprétée par Darwin aux chapitres 10 et 13. Au total, Darwin y consacre une cinquantaine de pages dans *L'Origine des espèces*.

Pourquoi a-t-il choisi d'appeler cette figure un « diagramme » ? Représente-t-elle une théorie, une classification ou un arbre généalogique ? Selon nous il s'agit bien d'une représentation diagrammatique dont la fonction est épistémique, et dont l'objet est la théorie de l'évolution de Darwin, car il s'agit à la fois d'une « représentation théorique²⁵⁷ » qui exprime des hypothèses et d'un modèle graphique qui présente des mécanismes.

Avant de répondre aux questions posées ci-dessus, il est nécessaire de revenir brièvement aux analyses initiées par Nelson Goodman. Goodman, à travers la notion de « système symbolique », a cherché d'une part à généraliser la notion de langage afin de l'étendre aux représentations non linguistiques ; d'autre part, à classer ces représentations en différents types : les *représentations picturales* (qui ressemblent à leurs objets), les *représentations schématiques* (qui conservent la structure topologique de leur cible) et les *représentations diagrammatiques* (qui représentent spatialement des relations non spatiales). Un système symbolique peut donc être défini comme un ensemble de marques qui entretiennent des

²⁵⁶ Notre analyse reprend des éléments tirés de : F. Ferri, « Unveiling Darwin's Theory of Evolution through the Epistemological Study of his Diagram », in Peter Chapman et al. (eds.), *Diagrammatic Representation and Inference. 10th International Conference, Diagrams 2018, Edinburgh, UK, June 18-22, 2018, Proceedings*, Cham, Springer, LNAI 10871, 2018, p. 791-795.

²⁵⁷ M. Vorms, *Théories: mode d'emploi : une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques*, Thèse de doctorat en philosophie, Université Paris 1, 2009, p. 367.

relations syntaxiques entre elles, mais aussi des relations sémantiques avec les objets d'un champ de référence, afin de remplir diverses fonctions, qu'elles soient d'ordre esthétique, mnémotechnique ou épistémique. Nous nous concentrons sur la fonction épistémique de cette représentation diagrammatique qu'est le diagramme de Darwin.

Le diagramme de Darwin illustre le mécanisme de la sélection naturelle en mettant en évidence quatre principes (variation, descendance, divergence et extinction) qui convergent vers le même phénomène : la descendance avec modification. Ce diagramme ne sort pas de nulle part, car comme nous l'avons montré à travers la restitution des analyses de Bredekamp – qui lui-même s'appuie sur le travail de Julia Voss²⁵⁸ – il est le résultat d'un processus de conception qui s'est étendu sur plus de vingt ans. En outre, il présuppose un corps d'hypothèses qui ont été énoncées par Jean Gayon²⁵⁹. Ces hypothèses sont les suivantes :

1. *Les espèces se modifient ;*
2. *Cette modification est graduelle ;*
3. *Beaucoup d'espèces disparaissent ;*
4. *Celles qui ne disparaissent pas se divisent en plusieurs variétés ;*
5. *Ces variétés divergent indéfiniment et graduellement ;*
6. *La classification des espèces est subordonnée à leur généalogie car le diagramme s'applique à tous les niveaux taxonomiques.* En terme savant on dirait que le diagramme présente une invariance d'échelle, qui d'ailleurs, comme l'a remarqué Greg Priest, fait penser aux fractales²⁶⁰ ;

²⁵⁸ J. Voss, *Darwin's Pictures: Views of Evolutionary Theory, 1837-1874*, New Haven, Connecticut, Yale University Press, 2010.

²⁵⁹ J. Gayon, « Mort ou persistance du darwinisme ? Regard d'un épistémologue », *Comptes Rendus Palevol*, vol. 8, n° 2, 2009, p. 321-340.

²⁶⁰ G. Priest, « Diagramming Evolution: The Case of Darwin's Trees », *Endeavour*, vol. 42, n° 2, 2018, p. 157-171.

7. *Les catégories taxonomiques sont donc toutes arbitraires ;*
8. *Le processus de différenciation biologique des êtres vivants est donc réduit au processus de différenciation des espèces en variétés : les taxons d'ordre supérieur ne jouent pas de rôle particulier.*

Comment le diagramme est-il organisé ? Tout d'abord, on peut repérer deux axes : l'un vertical, l'autre horizontal. Le diagramme se lit de bas en haut. Sur l'axe vertical, une série de 14 chiffres romains indique le cours du temps : cet axe ne mesure pas une durée, mais stratifie des générations. Il peut être interprété comme un axe générationnel (c'est ce que fait Darwin au chapitre 4) ou comme un axe de profondeur paléontologique (comme Darwin le fait au chapitre 10). Sur l'axe horizontal, une série de 11 lettres majuscules représente 11 variétés, qui peuvent se référer à différentes espèces ainsi qu'à des variétés du même type (par exemple des primevères dans une région de l'Angleterre), ou à des variations au sein d'une même population ou même de plusieurs populations. Cela permet à Darwin de « quantifier librement », pour reprendre une expression du mathématicien Grothendieck²⁶¹.

Il est essentiel de comprendre que le but de Darwin n'est pas d'exposer une classification phylogénétique des formes vivantes, mais de symboliser une « idée dangereuse²⁶² », celle selon laquelle il n'y a pas de dessein intelligent pour expliquer le principe de l'évolution des espèces, mais seulement un processus de sélection naturelle sans fin, qui opère lorsque le hasard et la nécessité agissent ensemble, dans un contexte malthusien de lutte pour l'existence²⁶³.

²⁶¹ R. Krömer, « La "machine de Grothendieck" se fonde-t-elle seulement sur des vocables métamathématiques ? Bourbaki et les catégories au cours des années cinquante », *Revue d'histoire des mathématiques*, vol. 12, n° 1, 2006, p. 155-198.

²⁶² D. C. Dennett, *Darwin's Dangerous Idea: Evolutions and the Meanings of Life*, New York, Simon & Schuster, 1995.

²⁶³ M. A. Ragan, « Trees and Networks before and after Darwin », *Biology Direct*, vol. 4, n° 1, 2009, p. 43.

Les 11 lettres sous la première ligne horizontale expriment une divergence morphologique, anatomique et écologique (voir Figure 136). Leur écart variable correspond à la distance relative entre plusieurs espèces (il y a par exemple plus de proximité entre *E* et *F* qu'entre *F* et *G*). Cela signifie que ces lettres majuscules représentent des catégories taxonomiques indéterminées. En procédant ainsi, Darwin fait ce que Cavaillès appellera plus tard une opération de « thématization », parce qu'il transforme les propriétés en des objets dont il va étudier les propriétés. Variation, filiation, divergence et extinction sont des propriétés objectivées par les lignes du diagramme et elles sont polarisées suivant ses deux axes qui permettent aux « branches taxonomiques » d'apparaître²⁶⁴.

En nous donnant à voir la survie et l'extinction des espèces, Darwin réussit à saisir l'infinie variabilité de la nature en une représentation synoptique finie. De cette façon le diagramme symbolise une totalité dynamique par une représentation statique. Cependant, il faut de nouveau signaler que c'est en raison d'un contexte concurrentiel que Darwin a été contraint de représenter sa théorie de l'évolution dans un diagramme qui s'inspire de l'image de l'arbre. En effet, si Wallace n'avait pas réhabilité cette image cruciale, Darwin n'aurait peut-être pas été enclin à le faire lui-même²⁶⁵.

Si les lignes de chaque variété voisine (*A*, *B*, *C*, *D*) sont prolongées, elles peuvent être reliées en dehors du diagramme pour converger vers un point d'origine qui permet de formuler l'hypothèse d'un groupe ou d'une population d'origine (voir Figure 137). Inversement, les pointillés qui vont de *A* aux strates supérieures ne représentent pas la descendance réelle de cette variété, mais les variations qui en résultent. On peut noter qu'il y a une forte variabilité pour la population *A* alors qu'il n'y en a pas pour la population *D*. Plus les variations initiales sont importantes, plus la population *A* prolifère dans le temps :

²⁶⁴ T. Hoquet, *op. cit.*, p. 127.

²⁶⁵ Voir Bredekamp, *op. cit.*, ch. 4.

les différences, d'abord minimales, conduisent à une différenciation considérable sur le long terme. Au fil du temps, les populations diffèrent les unes des autres.

Darwin affiche alors de nouvelles lettres minuscules pour articuler cette différenciation (*a*, *m*, *z*, etc.). Si les lignes horizontales numérotées de I à X indiquent les variations de chaque génération, elles ne poursuivent qu'une seule variété lorsque les variations donnent lieu à un écart majeur. Sur les quatre dernières lignes horizontales (XI à XIV), Darwin dessine des lignes évolutives générales (a^{14} , q^{14} , p^{14} , etc.) qui ne tiennent pas compte des variations abandonnées pendant l'évolution (entre les lignes I et X).

Darwin réussit ainsi à montrer qu'une même population de départ peut être divisée en différentes espèces, familles, types et classes très éloignées les unes des autres et qui ne sont plus liées à l'ancienne population. Après quatorze séquences temporelles, *A* n'existe plus : elle s'est transformée en huit nouvelles variétés plus ou moins éloignées les unes des autres (a^{14} , q^{14} , p^{14} , b^{14} , f^{14} , o^{14} , e^{14} , m^{14}). Inversement, d'autres espèces, telles que *E* et *F*, n'ont subi aucune variation : non contraintes à se modifier, elles peuvent résister au temps sans se diversifier. D'autre part, certaines lignées de populations, par exemple celles de *C* ou *D*, rencontrent au fil du temps les lignées d'autres populations qui ont proliféré : si elles se prolongeaient, elles entreraient en conflit dans le diagramme (voir Figure 137). Darwin illustre ainsi la compétition entre les espèces. Mieux adaptées, les nouvelles variétés supplantent les anciennes, qui disparaissent ensuite. Cela signifie que des variétés trop proches sont en concurrence les unes avec les autres. Par conséquent, plus la variabilité d'une population est grande et plus les caractéristiques sont divergentes, plus une population a de chances de survivre, de proliférer et de se diversifier.

Les formes de la strate XIV ne peuvent plus se croiser ou avoir des descendants ensemble, mais elles partagent un ancêtre commun si leur lignée est étendue, ce qui explique pourquoi les formes de vie peuvent conserver des caractéristiques communes qu'elles ont

héritées d'ancêtres éteints. C'est pourquoi ce diagramme aura une influence importante sur la classification des espèces.

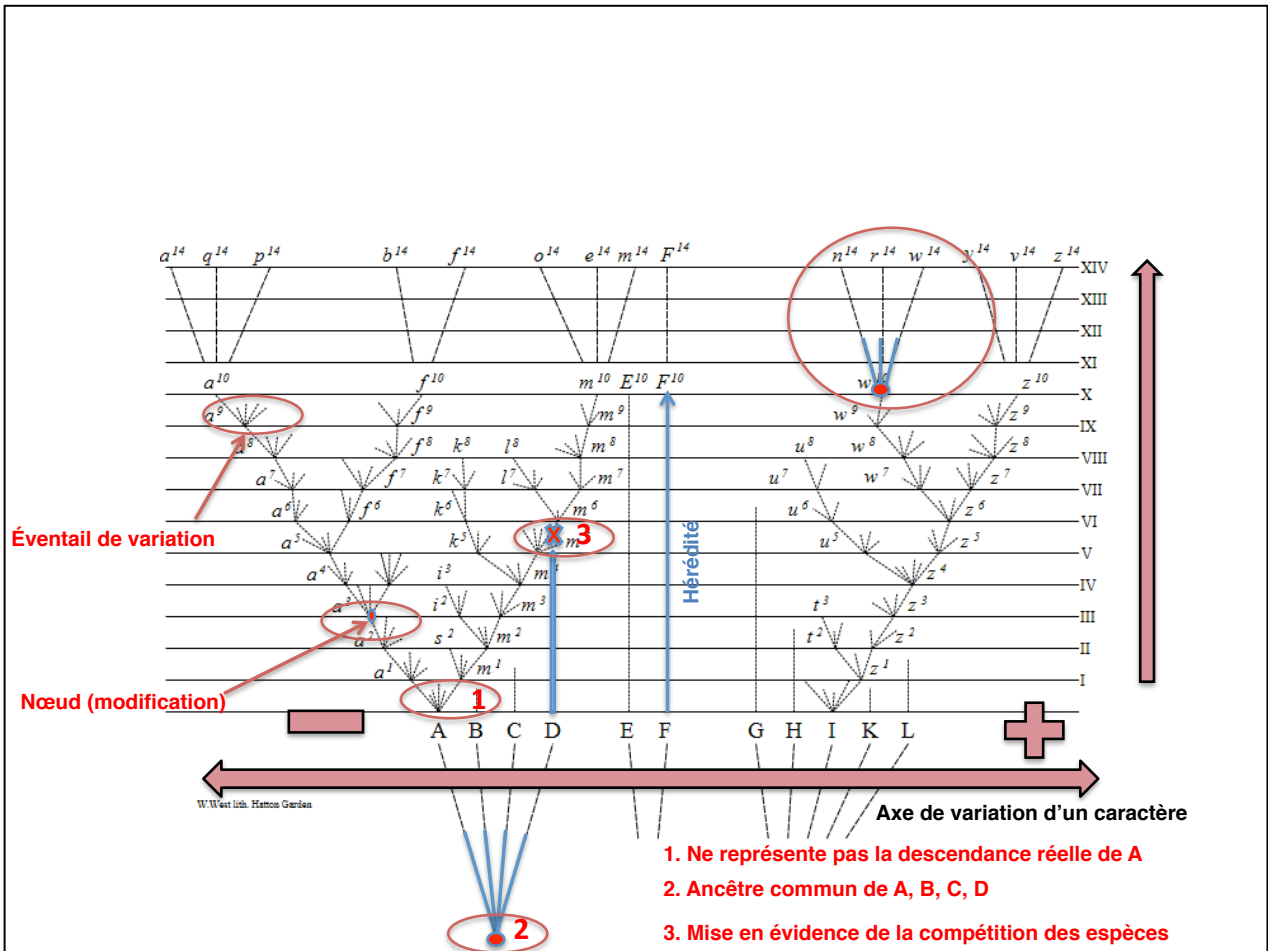


Figure 137 : Annotation personnelle du diagramme de Darwin

BILAN DU CHAPITRE 6

L'abaque de Smith, bien que très peu connu en dehors du cercle des amateurs d'antennes, est peut-être le plus emblématique des diagrammes, avec ses engrenages graphiques de résistance et de réactance. C'est une authentique machine graphique, car c'est un solveur de problèmes techniques pour qui sait le lire et le manipuler, moyennant la maîtrise de quelques rudiments d'électromagnétisme. Le diagramme de Davenport est quant à lui la machine de l'ingénieur du soin des équilibres acido-basiques : le médecin. Les diagrammes de Feynman et Randolph sont eux-mêmes d'authentiques diagrammes. Le premier est un calcul préfabriqué qui permet d'anticiper la pertinence ou la non pertinence de l'effectuation d'un calcul relatif à une situation d'interaction à l'échelle quantique. C'est un abrégiateur, une machine graphique qui simplifie l'expression de la forme d'un calcul complexe et rend perceptible la pertinence ou non de l'opérer avec du papier et un crayon, grâce à l'association des composantes du diagramme à des expressions analytiques. Les diagrammes de Randolph sont quant à eux un système de notation diagrammatique qui simplifie la pratique des calculs sur des ensembles : leur design offre des saillances qui permettent en quelques traits de crayon et en quelques coups d'œil d'opérer les transformations et réductions nécessaires à l'obtention du résultat d'un calcul. Les diagrammes de Clapeyron et enthalpique sont eux-mêmes d'authentiques diagrammes : leur originalité est qu'il s'agit de machines graphiques dont le fonctionnement modélise celui de machines thermodynamiques réelles (compresseur ou climatiseur dans les cas que nous avons étudiés). Enfin, le diagramme de Darwin est un exemple de machine graphique qui machine une théorie afin d'en exhiber le fonctionnement au sein d'une totalité synoptique : ce diagramme a cela d'impressionnant qu'il compacte dans l'espace d'une feuille de papier vingt ans de recherche sur la théorie de l'évolution dans une représentation graphique dont la manipulation en exhibe les mécanismes de fonctionnement à travers la géométrie fractale

d'un arbre qui symbolise la Nature vivante embrassée dans la totalité de sa dispersion spatiale et de son déploiement temporel.

**TROISIEME PARTIE : LES DIAGRAMMES ENTRE NATURE ET
CULTURE**

PLAN DU CHAPITRE 7

Nous montrons dans ce chapitre²⁶⁶ comment une rupture en apparence aussi révolutionnaire que l'apparition des technologies numériques s'inscrit en réalité dans une profonde continuité avec ce qui les précèdent : la technologie graphique de l'écriture alphabétique. La machine de Turing, qui est le modèle théorique du fonctionnement d'un ordinateur, peut être vue rétrospectivement comme le produit terminal d'une profonde réflexion sur le rapport de l'homme à son papier et à son crayon. En décrivant les conditions historiques de possibilité de l'avènement d'une discipline nommée « intelligence artificielle », nous proposons dans un premier temps une brève histoire de la raison instrumentée comme préalable nécessaire à une critique de la raison technoscientifique contemporaine. Dans un second temps, nous montrons que l'analyse des diagrammes révèle un mode de fonctionnement permettant de caractériser le diagrammatique comme un nouveau régime de rationalité dans l'histoire de l'écriture. Nous identifions les spécificités de ce régime pour commencer à caractériser sa différence avec les régimes d'écritures alphabétique et numérique. Dans un troisième et dernier temps, nous reposons le problème de la différence phénoménologique dans le contexte du régime d'écriture diagrammatique.

²⁶⁶ Ce chapitre est la reprise de trois articles : F. Ferri, « De la raison graphique à la raison computationnelle : une brève préhistoire de l'intelligence artificielle », *Interfaces numériques*, vol. 9, n° 1, 2020. DOI : 10.25965/interfaces-numeriques.4125 ; F. Ferri, « Comment et pourquoi le diagrammatique transforme-t-il l'histoire de l'écriture ? », *Cahiers philosophiques*, vol. 163, n° 4, 2020, p. 47-59 ; F. Ferri, « Le langage diagrammatique au-delà de la différence phénoménologique », in L. Boi & C. Lobo (eds.), *When Form Becomes Substance*, Cham, Birkhäuser-Springer Nature, 2022, p. 485-496. Cette dernière contribution correspond à la publication des actes du colloque international « Quand la forme devient substance : puissance des gestes, intuition diagrammatique et phénoménologie de l'espace », organisé par le Collège international de philosophie avec le soutien du CAMS (EHESS), de l'Institut Culturel Italien (Paris) et du CFCUL (Lisbonne) et parrainé par la Société Mathématique de France, Lycée Henri-IV, 25-26-27 janvier 2018, Paris.

CHAPITRE 7. DIAGRAMME ET HISTOIRE DE LA RATIONALITE GRAPHIQUE

1. Introduction

Ce chapitre propose une petite histoire du processus de grammatisation, dans la mesure où il conduit au modèle de Turing, qui est toujours celui à partir duquel on pense le phénomène de la discrétisation généralisée, tel qu'il s'opère actuellement dans la technoscience contemporaine, qui appréhende la Nature comme une gigantesque machine informationnelle qu'elle manipule et théorise sur plus de soixante ordres de grandeur de dimension spatiale²⁶⁷. L'histoire de la grammatisation peut se résumer en cinq grands moments :

1. Grammatisation de la parole, c'est-à-dire *devenir-lettre* du son par lequel apparaît l'écriture.
2. Grammatisation de l'écrit, c'est-à-dire *discrétisation* de la langue écrite rendant possible l'émergence de la logique puis de la grammaire grâce à la réflexivité linguistique.
3. Grammatisation des corps, c'est-à-dire *devenir-machine* des gestes qui rend possible l'automatisation des savoir-faire du fait de l'extériorisation d'opérations fonctionnelles dans des machines.
4. Grammatisation de la perception, c'est-à-dire enregistrement des sons et des images par des appareils analogiques, rendant possible leur discrétisation et leur reproduction.
5. Grammatisation de l'intellect, c'est-à-dire *devenir-algorithmique* des opérations de l'esprit déléguées à des processus de résolution de problèmes confiés à des machines computationnelles.

²⁶⁷ S. Haroche, *Physique quantique*, Paris, Fayard/Collège de France, 2004.

2. De la raison graphique à la raison computationnelle

2.1 Naissance de l'écriture alphabétique et formation de la raison graphique

L'apparition de l'écriture fut d'une importance considérable dans la structuration de la société grecque. Sans l'écriture, il n'y aurait pas eu la publication du droit, l'égalité citoyenne publiquement constituée par l'inscription de la loi, et donc l'ouverture d'un espace et d'un temps politique : celui de la cité²⁶⁸. L'écriture alphabétique rend possible une réflexivité dans la mesure où elle implique l'enregistrement exact de la parole²⁶⁹, transformant ainsi le rapport que les hommes ont au langage, mais aussi à ce qu'ils font et à ce qu'ils disent. La réflexivité généralisée, le rapport à soi et aux autres induit par la mise en miroir de ce que l'on fait et dit à travers la spatialisation des faits, gestes et paroles sous la forme de discours écrits, induit une mise en crise des modes de vie du fait qu'elle rend possible une activité critique à la lettre et *par* la lettre. Le citoyen est en effet celui qui a acquis une compétence littérale. C'est à la fois un lecteur et un scripteur qui manipule des lettres (γράμμα), capable d'analyser et de synthétiser des énoncés logiques, pour vérifier la cohérence interne et la correspondance véridique d'un discours, et produire à son tour des énoncés critiques ou des propositions positives. Ces propositions engagent un discours de vérité et impliquent des actes, c'est-à-dire des transformations effectives du réel par des décisions pratiques. Cette situation critique aboutit à une crise de la cité au 5^e siècle avant J.-C., au moment où les sophistes s'emparent de l'écriture comme d'un moyen pour contrôler les esprits par l'intermédiaire de psychotechniques de captation et de formation de l'attention (la lecture et l'écriture). Car le sophiste est littéralement le maître d'école (γραμματιστής), celui qui instruit et fait acquérir les lettres aux jeunes athéniens. Par conséquent, l'écriture

²⁶⁸ B. Stiegler, « Le carnaval de la nouvelle toile », in B. Juanals et J.-M. Noyer (dir.), *Technologies de l'information et intelligences collectives*, Paris, Hermes Science Publications, 2010, ch. 2. Voir aussi : M. Detienne (dir.), *Les savoirs de l'écriture en Grèce ancienne*, Lille, Presses universitaires de Lille, 1988.

²⁶⁹ B. Stiegler, *La technique et le temps 2. La désorientation*, Paris, Galilée, 1996.

alphabétique est une technologie de l'esprit qui ré-agence les rapports des individus à eux-mêmes et aux autres. Son apparition constitue selon Sylvain Auroux la première grande révolution technologique intellectuelle qui a engendré un processus qui traverse toute l'histoire et qui ne cesse toujours pas de s'étendre dans l'espace et de s'accélérer dans le temps. Ce processus, il l'appelle « grammatisation²⁷⁰ ». La grammatisation désigne originellement l'apparition des lettres, et la discrétisation des éléments du langage qu'elle rend possible. On peut distinguer trois niveaux²⁷¹ :

- un niveau *physique*, constitué des sons du flux de parole langagier. La discrétisation commence à opérer lorsque l'on segmente ce substrat audio-acoustique.
- Un second niveau, *phonétique*, où s'opère une segmentation d'unités linguistiques non encore pourvues de sens : les phonèmes.
- Un niveau *signifiant*, enfin, proprement linguistico-langagier, où les phonèmes sont mis en relation par les fonctions syntagmatique et paradigmaticque de la chaîne parlée qui définissent la structure du langage signifiant en tant qu'il est orienté vers un sens. Il s'agit de la double articulation du langage qui a été relevée par Martinet²⁷².

Ce qu'il faut comprendre, c'est que cette discrétisation ouvre la possibilité d'une reproductibilité du langage grâce à son enregistrement alphabétique, qui lui-même rend possible son analyse. Or c'est cette analyse qui rend possible une *discrimination*, et donc un nouveau type de *discernement*. L'esprit est transformé par l'écriture, d'une part parce qu'il accède grâce à elle à des virtualités qu'il objective et qui étendent sa connaissance du réel ; d'autre part parce qu'il peut y avoir accès de manière indéfinie grâce à ce que Husserl appelait la « réactivation » (*Rückfrage*) de l'origine²⁷³. 2500 ans après Platon, nous pouvons

²⁷⁰ S. Auroux, *La révolution technologique de la grammatisation*, Liège, Mardaga, 1994.

²⁷¹ J. Lassègue, *Pour une anthropologie sémiotique : recherche sur le concept de forme symbolique*, mémoire original d'Habilitation à diriger des recherches, Université Paris Sorbonne-Paris IV, 2010, p. 51-52.

²⁷² A. Martinet, *Éléments de linguistique générale*, Paris, Armand Colin, 1960.

²⁷³ J. Derrida, « Introduction », *L'origine de la géométrie*, Paris, Presses universitaires de France, 1962.

encore lire ce qu'il a écrit et avoir un accès littéral à sa pensée, virtuelle, donc réelle, parce que consignée alphabétiquement. Autrement dit, cela signifie que la science se trouve dans sa bibliographie²⁷⁴. Mais la principale transformation qu'induit l'écriture sur l'esprit, c'est celle de son rapport à la mémoire. En effet, au lieu de mémoriser un discours, si on le consigne sur du papier, l'écriture nous permet de rendre spatial, dans un séquençement linéaire, le flux temporel de la parole, et ainsi de dégager dans la chaîne alphabétique d'autres propriétés que celles de la remémoration²⁷⁵. En spatialisant la parole, nous perdons un certain nombre de propriétés, comme par exemple les marqueurs émotionnels du discours, mais nous en découvrons de nouvelles, comme par exemple les règles de grammaire qui structurent la langue dans laquelle nous parlons. Si l'écriture produit « un supplément d'intelligibilité à la parole²⁷⁶ », elle en supprime donc aussi certains niveaux de compréhension, saisissables uniquement dans l'actualité de la parole prononcée. L'écriture se présente donc comme une technique, qui permet de proposer à l'esprit des constructions intellectuelles qui autorisent la constitution de nouveaux concepts, parce qu'elles donnent accès à des virtualités qui peuvent être déterminées. En effet, si « l'écriture correspond au concept de transcription phonétique, elle ne correspond pas aux concepts de grammaire et de déclinaison, qu'elle permet néanmoins de constituer²⁷⁷ ». Autrement dit « la technique permet, à travers la structuration qu'elle apporte à l'espace et au temps de notre expérience, de constituer de nouvelles connaissances et de nouveaux concepts²⁷⁸ ».

²⁷⁴ E. Husserl, *Recherches logiques, tome 1 : prolégomènes à la logique pure*, Paris, Presses universitaires de France, 1959, p. 10.

²⁷⁵ B. Bachimont, « Signes formels et computation numérique ».

²⁷⁶ *Ibid.*, p. 5 du fichier pdf : http://www.utc.fr/~bachimon/Publications_attachments/Bachimont.pdf

²⁷⁷ *Ibid.*, p. 8.

²⁷⁸ *Id.*

Jack Goody a ainsi montré comment l'écriture induit un mode de pensée et un rapport au monde spécifiques²⁷⁹. Ces structures d'ordonnement, constitutives de la raison graphique, sont les suivantes : la liste, le tableau et la formule.

1. La liste. Elle permet de rassembler des éléments dispersés dans la parole (comme les mots) et donc de former un concept désignant une nouvelle connaissance sur la façon dont est organisée la langue. Par exemple, grâce au concept de « même forme lexicale », nous pouvons rassembler des mots qui se ressemblent, par exemple « rosa, rosa, rosam, rosae, rosae, rosa », et ainsi extraire un paradigme de déclinaison (système des différentes formes que peuvent prendre les mots selon leur fonction dans la phrase latine). Par conséquent, le type de pensée induit par la liste est la *classification*. L'opération cognitive qui lui est associée est la *catégorisation* entendue comme classification logique.

2. Le tableau. Il représente la mise en rapport de plusieurs listes (lignes + colonnes) selon les deux dimensions de l'espace de l'écriture. Par exemple le tableau de Mendeleïev, grâce à sa systématisme, a permis de prédire que de futurs éléments devaient être découverts (tel est le cas de l'uranium). Le type de penser induit par le tableau est alors le *système*. L'opération cognitive qui lui est associée est la *systématisation* entendue comme classification prédictive.

3. La formule. Elle désigne un procédé permettant de conduire des raisonnements en fonction de la forme, sans avoir à prêter attention à la signification des symboles écrits. Cette structure graphique est à l'origine du développement de la logique formelle et des mathématiques. L'opération cognitive qui lui est associée est la *formalisation* entendue comme algébrisation de la pensée.

²⁷⁹ J. Goody, *The Domestication of the Savage Mind*, Cambridge-London-New York, Cambridge University Press, 1977. Traduction française : J. Goody, *La raison graphique*, op. cit.

La seconde révolution technologique de la grammatisation, Auroux la situe au moment de l'invention de l'imprimerie moderne aux 15^e et 16^e siècles, car celle-ci rend possible une diffusion plus grande de l'écriture. Leroi-Gourhan a montré que la multiplication des imprimés a eu pour conséquence majeure une accumulation gigantesque des textes qui a nécessité une assistance à l'orientation dans la géographie de la mémoire collective et donc la construction d'appareils de navigation²⁸⁰, offrant ainsi un gain de temps et des raccourcis dans la recherche des contenus savants et culturels.

La troisième révolution technologique de la grammatisation a eu lieu avec la convergence des technologies informationnelles (informatique, audiovisuel, télécommunications) que le numérique a rendu possible il y a une quinzaine d'années²⁸¹, en universalisant le codage de l'information sur un support dynamique permettant d'opérer des calculs projectifs qui régénèrent les contenus manipulés sur des interfaces virtuelles. Support universel de codage « donnant lieu à un système technique homogène²⁸² », le numérique instrumente les lois du calcul (algorithmes) pour manipuler et régénérer d'une façon automatisée tous les contenus de connaissances et toutes les formes sémiotiques d'expression, saisissables grâce à des terminaux de sortie (écrans, hauts-parleurs, etc.) qui permettent leur appropriation perceptive.

Si la machine de Turing marque l'acte de naissance de l'informatique comme science, la réalisation du premier ordinateur en marque la naissance comme ingénierie. Dans l'informatique, il y a deux mots en un : information et automatique. L'informatique désigne donc le traitement automatique de l'information, tel qu'il est mis en œuvre par une machine concrète, qui est un centre de calcul : l'ordinateur. Puisque le traitement est

²⁸⁰ A. Leroi-Gourhan, *Le Geste et la Parole*, tome 2, *op. cit.* ; B. Stiegler, « Machines à écrire et matières à penser », *Genesis*, n° 5, 1994, p. 25-49.

²⁸¹ B. Stiegler, *La technique et le temps*, 3. *Le temps du cinéma et la question du mal-être*, Paris, Galilée, 2001.

²⁸² B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*, *op. cit.*, p. 15.

effectué par la médiation de calculs (algorithmes) sur des codages (informations), l'informatique est donc une science. Enfin, on peut dire qu'elle est une science de la nature, car elle permet de comprendre comment des systèmes physiques *structurellement* différents peuvent être *fonctionnellement* homologues, car capables d'opérer les mêmes transferts logiques d'information, et donc être susceptibles d'une même modélisation algorithmique²⁸³.

En inventant l'ordinateur, l'homme a donc inventé une machine qui reçoit, stocke, traite et émet de l'information. L'ordinateur est une machine universelle dans la mesure où il mime le comportement de toute chose de ce monde, dès lors que ce comportement peut recevoir une formalisation temporelle qui s'exprime par une représentation algorithmique, dont on peut piloter l'exécution à partir de la rédaction d'un programme. Les racines historiques de l'informatique sont à la fois d'ordre technique, scientifique, politique et militaire.

2.2 Généalogie de notre époque : l'esprit, la vie et la nature comme machines informationnelles

Il n'y a pas de science ni de technique sans ce que Karl Popper a appelé un « programme de recherche métaphysique²⁸⁴ », c'est-à-dire sans un ensemble d'idées qui drainent avec elles des propositions de réponses aux grandes questions métaphysiques. Or la convergence NBIC apparue au début des années 2000 est mue par les idées des sciences cognitives²⁸⁵. L'idée centrale de ce programme étant que tout dans l'univers est information. Elle fut résumée dans une formule de John Archibald Wheeler : « *It from bit*²⁸⁶ ». Ce qui signifie : tout ce qui existe vient de l'information, tout dans l'univers est réductible à une quantité d'information.

²⁸³ B. Chazelle, *L'algorithmique et les sciences*, Paris, Fayard/Collège de France, 2012, §68.

²⁸⁴ K. Popper, *Unended Quest : An Intellectual Autobiography*, Open Court Publishing, LaSalle, Illinois, 1974.

²⁸⁵ J.-P. Dupuy, « Quand les technologies convergeront », *Revue du MAUSS*, vol. 23, n° 1, 2004, p. 408-417.

²⁸⁶ J. A. Wheeler, « Information, Physics, Quantum : the Search for Links », in S. I. Kobayashi, H. Ezawa, Y. Murayama *et al.* (eds.), *Proceedings of the 3rd International Symposium. Foundations of Quantum Mechanics*, The Physical Society of Japan, Tokyo, 1990.

Dans l'histoire des idées, c'est d'abord l'esprit humain qui a été conçu en ces termes, durant la Seconde Guerre mondiale, quand les sciences cognitives naissantes identifèrent le cerveau à une machine informationnelle²⁸⁷. On peut identifier l'article de Warren McCulloch et Walter Pitts, dans lequel ils montrent comment il est possible de considérer le cerveau comme une réalisation matérielle d'une machine de Turing²⁸⁸, comme un des articles fondateurs des sciences cognitives et de la cybernétique. Le second article fondateur étant celui co-écrit par Norbert Wiener, Arturo Rosenblueth et Julian Bigelow²⁸⁹. Les sciences cognitives s'enracinent en effet dans la cybernétique, et la cybernétique, dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale. Comme le rappelle dans son ouvrage éponyme²⁹⁰ le père de la cybernétique, Norbert Wiener, c'est le contexte de la guerre qui l'a conduit avec d'autres scientifiques à usurper deux fonctions accomplies par le cerveau humain – 1° opérer des calculs et 2° rétroagir sur une conduite pour la diriger vers l'accomplissement d'un objectif – afin de réaliser deux dispositifs électromécaniques (un calculateur électronique et un dispositif de tir anti-aérien) dans le cadre d'un projet militaire de l'armée américaine.

Ensuite, c'est la vie qui a été conçue comme une machine informationnelle par le groupe de biologistes ayant conduit à la révolution de la biologie moléculaire au milieu du 20^e siècle, dont le couronnement fut l'attribution à James D. Watson, Francis Crick et Maurice Wilkins du prix Nobel de médecine en 1962, après leur découverte de la structure de l'ADN en 1953. Dans ce paradigme, l'ADN est le code dans lequel est écrit le génome – identifié au programme de l'organisme vivant – qui pilote la machinerie cellulaire, réduite à une machine cybernétique commandant l'ontogenèse de l'individu biologique.

²⁸⁷ Une machine informationnelle et non un ordinateur, car lorsque le programme des sciences cognitives fut lancé, l'ordinateur n'existait pas encore. L'ordinateur est donc une conséquence de cette idée, non son origine.

²⁸⁸ W. McCulloch & W. Pitts, « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity », *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, 1943, p. 115-133.

²⁸⁹ N. Wiener, A. Rosenblueth & J. Bigelow, « Behavior, Purpose and Teleology », *Philosophy of Science*, vol. 10, n° 1, 1943, p. 18-24.

²⁹⁰ N. Wiener, *La Cybernétique*, Paris, Seuil, 2014.

Enfin, c'est la nature qui a été appréhendée comme une immense machine informationnelle, un ordre pouvant être investigué au moyen d'algorithmes, nouveaux outils d'exploration des sciences de la nature se distinguant des équations de la science classique²⁹¹. Esprit, vie et nature sont donc appréhendés, dans ce paradigme, comme des machines informationnelles²⁹².

Dès lors si tout est information, l'objectif devient celui de se rendre maîtres et possesseurs de ces machines, en en concevant de nouvelles : c'est ainsi que la neurophysiologie, matrice des sciences cognitives, laisse la place à l'intelligence artificielle à la fin des années 1950, et l'intelligence artificielle, à l'ingénierie des connaissances, avec le développement des systèmes experts dans les années 1980-1990, systèmes à base de connaissances instrumentant la résolution de problèmes non totalement réductibles à la modélisation formelle, qu'elle soit mathématique ou logique²⁹³. L'ingénierie des connaissances est une branche de l'intelligence artificielle qui définit dans des ontologies le savoir véhiculé dans les expressions des langues naturelles, pour obtenir des systèmes à base de connaissances qui sont des modèles des problèmes à traiter, et dont l'opérationnalisation computationnelle permet la résolution automatique partielle.

Or on sait d'après ce qui précède que tout système formel est opérationnel dans la mesure où toutes les opérations définies dans le système sont exécutables sur une machine de Turing, à partir du moment où cette exécution est compatible avec les ressources physiques de l'univers²⁹⁴. Puisque le symbolisme des systèmes formels automatiques est emprunté à la langue naturelle, les résultats de leurs opérations de traitement sont donc interprétables. Ils peuvent produire des formules générées par l'opérationnalisation

²⁹¹ B. Chazelle, *L'algorithmique et les sciences*, op. cit.

²⁹² J.-P. Dupuy, « Quand les technologies convergeront », art. cit.

²⁹³ B. Bachimont, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances*, 2^e éd., Paris, Hermes Science Publications, 1994.

²⁹⁴ B. Bachimont, « L'intelligence artificielle comme écriture dynamique », art. cit.

informatique dont l'interprétation linguistique correspond à des formations de sens inédites, donc à de nouvelles connaissances. Par conséquent, c'est la puissance calculatoire de l'outil informatique qui permet la formation de nouvelles connaissances, faisant ainsi de l'informatique un nouveau support d'instrumentation du savoir, dont la provenance historique est l'écriture alphabétique inscrite sur support graphique²⁹⁵.

Pourquoi les systèmes formels automatiques parviennent-ils à faire cela ? Du fait qu'ils ne sont pas des *modèles* des domaines des connaissances qu'ils formalisent, mais des *supports* de connaissances. De même qu'un livre autorise la constitution de nouvelles connaissances (logiques et grammaticales par exemple), de même un système formel autorise la constitution de nouvelles connaissances, car il s'agit d'un nouveau support, opératoire et calculatoire. L'ingénierie des connaissances est donc une technologie cognitive qui permet d'instrumenter la résolution de problèmes dans un domaine comme la médecine grâce à la construction de systèmes à base de connaissances. L'intelligence artificielle a ainsi commencé à s'humaniser lorsqu'elle est devenue une discipline technologique visant à réactiver les deux impensés de la théorie de l'information (la signification et l'interprétation) en instrumentant la résolution de problèmes grâce aux outils informatiques. Comme ingénierie des connaissances, elle est donc un projet technologique critique du programme cybernétique et de ses avatars, les réductionnismes computationnaliste et physicaliste. Dès lors, si l'intelligence peut et doit être instrumentée par le support numérique, elle ne peut pas se réduire à un calcul, aussi complexe soit-il. Humaniser le numérique, c'est d'abord produire une critique de la raison computationnelle comme l'a fait Bachimont. Un tel geste doit être prolongé par une critique de la raison technoscientifique, dont la fonction est de réinscrire sur le corps propre des individus psychiques et collectifs les points de repère d'une société numérique cartographiée.

²⁹⁵ B. Bachimont, *Herméneutique matérielle et Artéfacture : des machines qui pensent aux machines qui donnent à penser. Critique du formalisme en intelligence artificielle*, op. cit.

3. Comment et pourquoi le diagrammatique transforme-t-il l'histoire de l'écriture ?

Les champs des études visuelles et des pratiques graphiques ont trouvé depuis quelques années un lieu de convergence dans une classe d'objets – les diagrammes – dont la richesse épistémologique commence seulement à être caractérisée et exploitée. Après avoir montré que le diagramme est un objet d'étude transdisciplinaire au croisement de trois champs de recherche (la théorie des médias, la sémiotique et le design), nous nous focaliserons sur une propriété discriminante de cet objet graphique : son expressivité opératoire. Notre propos visera alors à argumenter en faveur de la thèse selon laquelle le caractère opératoire de cette expressivité permet d'appréhender le diagrammatique comme un nouveau régime de rationalité dans l'histoire de l'écriture, dès lors que par diagrammatique on entend une activité et une pratique de manipulation de diagrammes.

3.1 Le diagramme : un objet transdisciplinaire

Un diagramme est une représentation graphique, donc visuelle, d'un ensemble fini d'opérations par l'intermédiaire d'inscriptions. C'est donc une représentation pourvue d'un contenu interprétable dont le sens est celui d'un processus temporel. Un contenu interprétable est un contenu intentionnel au sens de la phénoménologie. Mais ce contenu est opératif lorsqu'il est saisi dans une dynamique pratique. Le diagramme, comme représentation graphique irréductible à la représentation picturale (comme par exemple une image photographique) ou schématique (comme par exemple une carte géographique), se caractérise par une intentionnalité opérative.

Nous allons montrer que le contenu de cette intentionnalité opérative se réfère non seulement à la technicité du geste humain que la machine peut capturer dans une structure qui fonctionne, mais aussi à une essence fonctionnelle qu'il rend visible à travers la figuration

d'un schème qui opère au sein d'une lignée technologique évolutive. Il s'agira ainsi de comprendre en quoi le diagramme est une inscription matérielle pourvue de sens, conservée dans un ensemble de traces non verbales. Nous appelons versant objectif ce versant du diagramme : objectif dans la mesure où le diagramme se réfère à un objet ou à un processus qui lui est extérieur et dont il est le signe graphique, et objectif au sens où ce signe graphique qu'est le diagramme est lui-même un objet en soi, un artifice. C'est en ce sens que le diagramme est un « outil de papier²⁹⁶ » (*paper tool*) participant à un processus de démonstration mathématique ou de concrétisation technologique.

En tant qu'outil, le diagramme est donc un objet technique saisissable par un sujet dans une activité pratique. Ce qui est en jeu dans cette dimension technique du diagramme, c'est la question de son appropriation par des sujets, c'est-à-dire par des consciences. Comment interpréter le diagramme ? Comment se l'approprier pour en faire quelque chose, c'est-à-dire en apprendre quelque chose, en comprendre quelque chose pour entreprendre autre chose que ce que nous donne à voir le diagramme, c'est-à-dire agir dans le monde pour le transformer grâce à son interprétation ? Tout le problème de l'interprétation du diagramme se concentre en un point de convergence : celui de l'insertion du sujet pratique dans la saillance perceptive ouverte par le caractère expressif du diagramme. La fonction du design d'information est de rendre accessible ce caractère expressif de nature opératoire.

Nous tenterons de montrer que l'expressivité diagrammatique n'est pas une idéalité statique qui plane dans le ciel des idées, mais qu'elle est une opérationnalité qui préside au couplage d'un sujet interprétant actif et d'une virtualité en voie d'actualisation. L'unité opérationnelle caractéristique de l'expressivité diagrammatique est celle qui est saisie à travers cette classe de représentations graphiques qu'on appelle depuis

²⁹⁶ U. Klein, « The Creative Power of Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry », in U. Klein (ed.), *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht, Springer, coll. « Boston Studies in the Philosophy and History of Science », vol. 222, 2001, p. 13-34.

Leroi-Gourhan « chaînes opératoires ». En ce sens, un diagramme est un « outil cognitif²⁹⁷ » (*cognitive tool*) qui permet de comprendre le monde. Avec un diagramme, on ne saisit pas des idéalités, on saisit des virtualités, et c'est cette saisie qui transforme le diagramme en objet producteur d'idéalité, c'est-à-dire producteur d'un sens ré-activable de manière indéfinie grâce à l'artifice de l'écriture.

Le diagramme désigne ainsi un objet qui dispose un ensemble d'informations opératoires sur le monde par l'intermédiaire des relations spatiales qu'entretiennent ses éléments sur une surface d'inscription. Il s'agit d'un objet transdisciplinaire que nous situons à la croisée de la théorie des médias, de la philosophie des pratiques savantes, de l'épistémologie du design et de la sémiotique visuelle. L'approche de la théorie des médias qui nous intéresse est la théorie du support élaborée par Bruno Bachimont. Elle s'inscrit dans le sillage des travaux anthropologiques initiés par Jack Goody²⁹⁸ et de la philosophie de la technique de Bernard Stiegler²⁹⁹, cette dernière puisant ses sources dans la phénoménologie de Husserl, les métaphysiques de Heidegger et Simondon, l'anthropologie de Leroi-Gourhan et la *Grammatologie* de Derrida.

3.1.1 La théorie du support

La théorie du support, qui est une théorie des médias, est le fruit d'une réflexion sur l'inscription des connaissances et sur les conséquences cognitives induites par les pratiques d'externalisation et de manipulation des inscriptions symboliques à travers des technologies culturelles.

²⁹⁷ V. Giardino, « Tools for Thought: The Case of Mathematics », *Endeavour*, vol. 42, n° 2-3, 2018, p. 172-179.

²⁹⁸ J. Goody, *La raison graphique*, *op. cit.*

²⁹⁹ B. Stiegler, *La technique et le temps*, Paris, Fayard, 2018. Cet ouvrage compile : B. Stiegler, *La technique et le temps 1*, Paris, Galilée, 1994 ; B. Stiegler, *La technique et le temps 2*, *op. cit.* ; B. Stiegler, *La technique et le temps 3*, Paris, Galilée, 2001.

La première idée qu'il faut retenir de la théorie du support, c'est qu'*il n'y a pas de savoir pérenne sans document supportant des inscriptions*. Les savoirs hérités transitent en effet à travers les *mathêmata*, qui désignent à la fois les connaissances dans leurs contenus et les manières dont ces contenus sont véhiculés dans des formules³⁰⁰, via des matières qui les supportent (du papyrus à l'électronique moléculaire en passant par le silicium). En langage contemporain, on pourrait dire que ce sont des formes sémiotiques d'expression véhiculées à travers des formats techniques de manipulation. Au cœur de l'objet du savoir (*mathêma*) se situe donc une double articulation : premièrement celle de la forme et du format, dont le trait d'union, actif mais non donné, est *information* (c'est-à-dire tension entre forme et format) ; deuxièmement l'articulation de la structure et de l'opération, dont le trait d'union, actif mais non donné, est *acte* (c'est-à-dire individuation).

La deuxième idée de cette théorie est que *le support matériel d'instrumentation du savoir qu'est le document reconfigure notre mémoire individuelle et sociale*. En soulageant notre mémoire, il nous permet de penser à d'autres choses, et donc de faire d'autres choses³⁰¹. Cela signifie d'une part que nos outils intellectuels induisent des modes de pensée qui se transforment en fonction de leur évolution, d'autre part qu'ils nous aident à penser différemment. Autrement dit, il y a une co-évolution des technologies intellectuelles et des catégories cognitives qui leur sont associées. Cela implique une dimension d'anthropologie philosophique et historique, qui conduit au deuxième champ de recherche dont le diagramme est selon nous l'objet : celui de l'anthropologie philosophique des pratiques d'écriture.

³⁰⁰ M. Foucault, cours inédit du 23 février 1983, dans *Magazine littéraire* n° 435, octobre 2004, p. 61.

³⁰¹ B. Bachimont, « Formal Signs and Numerical Computation: Between Intuitionism and Formalism. Critique of Computational Reason », in H. Schramm, L. Schwarte, J. Lazardzig (eds.), *Instruments in Art and Science. On the Architectonics of Cultural Boundaries in the 17th Century*, Berlin-New York, Walter de Gruyter, 2008, p. 362-382.

3.1.2 L'anthropologie philosophique des pratiques d'écriture

Par anthropologie philosophique des pratiques d'écriture, on désigne une approche sensible à la matérialité documentaire, aux techniques d'archivage et de classification, à l'histoire de ces pratiques. À l'intérieur des pratiques d'écriture, le lien entre les pratiques de notation et l'histoire des technologies cognitives est d'un intérêt particulier. L'expression « philosophie de la notation » est de Charles S. Peirce, le fondateur de la sémiotique, et remonte à un article de 1885³⁰². Mais la philosophie de la notation est un champ de recherche extrêmement récent puisque le premier congrès mondial sur la question a eu lieu en 2015 à l'université de technologie de Tallinn³⁰³.

Dans cette perspective, le diagramme ne fait sens selon nous que dans la mesure où il désigne l'inscription d'un geste correspondant à un moment fini d'un processus pratique. Le diagramme étant écrit, il n'est pas interactif ou dynamique. Il est l'inscription statique et spatiale d'un processus temporel et pratique.

De plus, le diagramme n'est un « technogramme³⁰⁴ » que dans la mesure où il est orienté vers un geste d'appropriation du savoir participant à une dynamique d'apprentissage et d'invention : il est porteur d'une virtualité qui en constitue le supplément d'intelligibilité. Le travail de mise en évidence de cette virtualité correspond à l'objectivation graphique de la théorie des opérations. Cette dernière implique un versant phénoménologique, que nous appelons dans le sillage du programme de Lennart Svensson³⁰⁵ la *phénoménographie* ; et un

³⁰² C. S. Peirce, « On the Algebra of Logic: A Contribution to the Philosophy of Notation », art. cit.

³⁰³ *History and Philosophy of Logic Notation: International Workshop on the Philosophy of Notation*, Tallinn, 1-2 August 2015. Voir aussi : F. Bellucci, A. Moktefi & A.-V. Pietarinen, « Introduction: History and Philosophy of Logical Notation », *History and Philosophy of Logic*, vol. 39, n° 1, 2018, p. 1-2.

³⁰⁴ C. Alunni, « De l'écriture de la mutation à la mutation de l'écriture : de Galileo Galilei et Leonardo da Vinci au "technogramme" », in F. Nicolas (dir.), *Les mutations de l'écriture*, Paris, Éditions de la Sorbonne, 2013, p. 123-137.

³⁰⁵ L. Svensson, « Theoretical Foundations of Phenomenography », *Higher Education Research & Development*, vol. 16, n° 2, 1997, p. 157-171.

versant interprétatif, que nous nommons l'*herméneutique opératoire*, au sens où le faire est l'interprétation du signe (herméneutique) et où le signe est l'expression d'une opération (opératoire). L'enjeu de la phénoménographie telle que nous l'entendons, c'est donc la mise en forme graphique des éléments notationnels pour rendre possible un accès rapide et efficace aux connaissances à véhiculer ; l'enjeu de l'herméneutique opératoire étant l'appropriation analogique des schèmes opératoires dont sont porteurs les diagrammes.

3.1.4 La sémiotique visuelle

Le troisième champ d'étude dont le diagramme est selon nous l'objet est l'épistémologie du design, entendue comme réflexion approfondie sur le potentiel cognitif et sémiotique des symboles graphiques.

Le diagramme est une unité mixte, pourvue d'une forme sémiotique s'exprimant à travers un format de représentation graphique. En ce sens, le diagramme permet de véhiculer des connaissances non linguistiques dans une pratique de lecture et d'écriture qu'il faut caractériser, dans la mesure où il s'agit d'un type d'écriture non littéral qui ne fait pas intervenir d'intelligibilité linguistique (même s'il peut la mobiliser).

Le diagramme comme objet épistémique élaboré au sein d'une activité savante (qui peut être scientifique mais qui ne l'est pas nécessairement) est donc relié à deux enjeux, herméneutique et pratique, car c'est une forme graphique qui fait sens et qui peut être manipulée. Dès lors, de quoi le diagramme est-il l'expression (sémiotique) et la représentation (graphique) ? Comment représente-t-il ses objets ? Inversement, comment un contenu peut-il devenir objet de représentation diagrammatique ?

Par représentation non linguistique, il faut comprendre que le diagramme a une relation de correspondance avec ce dont il est le représentant, c'est-à-dire avec son objet, qui est

d'ailleurs très souvent une opération³⁰⁶. Car le diagramme, dès lors qu'il circonscrit le schéma graphique d'un geste technique, devient le symbole d'une opération indéfiniment ré-actualisable. Cette correspondance, il faut donc l'entendre en un sens non psychologique. Correspondance veut dire ici rapport expressif schématisé dans le diagramme.

En tant que représentation graphique, le diagramme renvoie ainsi à une unité d'analyse locale. Dans sa réflexion sur les formats de représentation non linguistique, le philosophe Nelson Goodman a proposé une typologie des représentations graphiques en science³⁰⁷, à une époque où dominaient dans l'histoire et la philosophie des sciences les unités d'analyse globales (telles que les théories, les modèles et les paradigmes). Goodman s'est donc concentré sur l'étude d'unités d'analyse locales et il a proposé une typologie structurante des formats de représentation non linguistique qu'il a répartie suivant trois catégories : les représentations picturales, les représentations schématiques et les représentations diagrammatiques³⁰⁸.

Le type qui nous intéresse est le type diagrammatique, car il ne représente pas des relations spatiales, mais spatialise des relations non spatiales, ces relations pouvant être temporelles, causales, hiérarchiques.

Suivant cette acception héritée de Goodman, le diagramme désigne une unité d'analyse locale permettant de représenter spatialement, dans un espace graphique, des relations non spatiales. En spatialisant des relations non spatiales, le diagramme vise ainsi à représenter plus que les parties d'un objet et leur systématisme organique. Il vise à rassembler dans un espace synoptique de présentation les éléments d'une théorie. De ce point de vue, le

³⁰⁶ G. Simondon, « Les encyclopédies et l'esprit encyclopédique », in N. Simondon et I. Saurin (éd.), *Sur la philosophie, 1950-1980*, Paris, Presses universitaires de France, 2016, p. 120.

³⁰⁷ N. Goodman, *Languages of Art*, Indianapolis, Bobbs-Merrill, 1968. Traduction française : N. Goodman, *Langages de l'art*, Paris, Fayard, 2011.

³⁰⁸ Sur cette typologie, voir par exemple le chapitre 7 de la thèse de doctorat en philosophie de M. Vorms : *Théories, modes d'emploi : une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques*, op. cit.

diagramme est une unité d'analyse locale qui met en abyme une unité d'analyse globale comme par exemple une théorie. Tel est le cas du célèbre « arbre de la vie » (*Tree of Life*) de *L'Origine des espèces* de Darwin.

Au-delà de sa fonction épistémique, cette technologie graphique a une fonction pragmatique. Elle permet de comprendre en quoi et comment le diagramme est à la fois un outil d'abréviation (qui permet de retenir l'essentiel) et un guide pour l'action (qui permet l'anticipation et la prise sur le réel). Le diagramme permet d'instrumenter notre rapport au monde et de relier la connaissance à l'action. Il s'agit de le concevoir comme un médium. Comprendre l'originalité de ce médium nécessite de l'inscrire dans une longue histoire de l'écriture conçue comme une technologie qui transforme notre rapport au monde, à la pensée, et maintenant à la nature.

3.2 Diagramme et histoire de l'écriture : écriture alphabétique, écriture numérique et écriture diagrammatique

À la différence d'une inscription numérique mais à l'instar d'un enregistrement orthographique, un diagramme est une inscription matérielle pourvue de sens. Dans le cas de l'écriture alphabétique, l'enregistrement correspond à celui des contenus de la parole par les lettres en tant qu'actes de langage qui font sens dans un contexte d'énonciation. En effet, une écriture est un système qui permet la conservation des significations indépendamment de leur contexte d'énonciation, et c'est ce qu'explique le passage de l'idéogrammatique à l'orthographique, lorsque l'écriture dépasse la simple fonction d'aide-mémoire³⁰⁹. Contrairement à l'écriture alphabétique, la photographie et la cinématographie « sont des

³⁰⁹ Ces étapes sont décrites dans le chapitre 4 de la *Mésopotamie* de J. Bottéro : 1/ la pictographie ; 2/ le phonétisme ; 3/ l'écriture. Voir J. Bottéro, *Mésopotamie*, Paris, Gallimard, 1987.

formes d'orthographies sans orthophonie³¹⁰). Le sens de l'exactitude de l'écriture orthographique n'est pas la fidélité à la voix, mais à l'événement enregistré. L'écriture phonographique, écriture de son, reprend les sons comme phonèmes. Cela veut dire qu'elle retient de l'oral sa structure phonématique, la première articulation de la langue.

Dans un diagramme, le sens n'est pas phonographique, car il ne procède pas de la transcription d'un son, mais il est diagrammatique, c'est-à-dire qu'il est conservé dans un ensemble de traces non verbales, dans les inscriptions d'un support matériel non évanescent. Notre hypothèse est qu'à la suite du caractère « orthothétique » de l'écriture alphabétique (Stiegler) et du caractère « autothétique³¹¹ » de l'écriture numérique calculée (Bachimont), il est possible de dégager pour l'écriture diagrammatique un concept équivalent à celui de caractère « orthothétique » de l'écriture alphabétique. La rectitude « orthothétique » du diagramme (au sens où le diagramme doit donner accès à un contenu avec exactitude) est une rectitude non médiatisée par le son. C'est une vérité non littérale à laquelle on a accès avant l'usage du langage verbal. Le langage verbal peut dire cette vérité, mais le contenu de cette vérité et sa donation lui sont antérieurs et extérieurs.

Notre hypothèse est que le caractère « orthothétique » du diagramme est son expressivité opératoire. Le diagramme schématise en effet une syntaxe opératoire dont il permet d'effectuer l'exécution, mais il ne s'y réduit pas, car la continuité de la forme schématique dans le diagramme ne donne pas, selon la manière de lire, la même formalisation

³¹⁰ B. Stiegler, *La technique et le temps 2*, *op. cit.*, p. 40. Le point de départ du deuxième tome de *La technique et temps* de B. Stiegler a été d'abandonner la compréhension phonologique de l'écriture alphabétique pour se concentrer sur son caractère orthographique, les deux enjeux de cette approche étant l'exactitude et l'enregistrement.

³¹¹ L' « autothéticité », qui est le propre de l'écriture numérique calculée, désigne le fait que « le calcul ne pose (thèse) que lui-même (auto), indépendamment de toute autre relation ». B. Bachimont, « Le numérique comme support de la connaissance: entre matérialisation et interprétation », *in* G. Gueudet et L. Trouche (dir.), *Ressources vives. Le travail documentaire des professeurs en mathématiques*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2010. Voir p. 10 du document pdf suivant : https://www.hds.utc.fr/~bachimon/dokuwiki/_media/fr/chap4-bachimont-final.pdf

calculatoire. Cette expressivité, lorsqu'elle exprime une authentique propriété opératoire, permet de véhiculer un contenu porteur de sens qui est irréductible à un contenu linguistique ou à une pure effectivité calculatoire, puisqu'elle est pourvue de sens alors que le calcul est indifférent au sens (sens qu'il peut néanmoins contribuer à produire grâce à des conventions qui lui sont extérieures). Le contenu effectif expressif du diagramme est selon nous son opérationnalité. Toute la fonction du design d'information devient alors de rendre accessible ce caractère opérationnel du diagramme, pour faire de cette technologie graphique une médiation entre la connaissance et l'action, dans une donation de sens dont le contenu renvoie à une finitude opérationnelle mais non calculable.

3.3 Le diagramme comme médium technique et graphique

L'écriture est un médium situé entre le sujet connaissant et l'objet connu. C'est à la fois un instrument d'objectivation de virtualités donnant accès à de nouvelles connaissances, et un support d'inscription des connaissances scientifiques et phénoménologiques qui en permet la schématisation et la mémorisation. Nous voudrions montrer que l'observation et l'étude de la genèse du diagramme compris comme forme historique ressaisie dans l'histoire de la technologie de l'écriture nous permet de comprendre comment il est à la fois un support d'objectivation et de stabilisation du savoir ; mais aussi la condition de constitution, au sens phénoménologique du terme, de nouvelles connaissances, par la capacité qu'il a à rendre visibles des rapports réels qui ne l'étaient pas avant son invention. Constitué, il s'agit de savoir en quoi ce supplément qu'est le diagramme, comme support technique et mnémotechnique, est constituant de nouvelles catégories de pensée et de nouvelles pratiques savantes.

Ce à quoi ouvre cette pensée du diagramme pourrait être un questionnement sur la façon dont :

1. Notre rapport à l'écriture et à la lecture, comme structure de notre rapport rationnel à l'espace et au temps du monde, est conditionné par l'évolution d'une culture matérielle ;
2. Ce rapport mute du fait de la transformation de notre culture matérielle au cours de l'histoire ;
3. Cette transformation induit dans l'histoire elle-même une évolution des rapports de la théorie à la pratique.

Il s'agit donc d'étayer la thèse suivante (et la vérité de sa réciproque) : toute pratique est une écriture (et réciproquement toute écriture est une pratique). Cela veut dire : toute écriture est une pratique située *entre* des supports, une pratique exercée *avec* des supports et une pratique transformatrice à *même* des supports. À partir de là, on peut distinguer différentes phases dans l'histoire de d'écriture :

1. L'écriture dianoétique (*i.e.* celle du discours intérieur) comme dynamique de réinscription à même ce support qu'est la limite du corps propre (circuit audiophonologique) ;
2. L'écriture dialogique entendue comme dynamique de réinscription de la noèse à travers la parole (dont le support évanescent est l'air) ;
3. L'écriture graphique conçue comme dynamique de réinscription à même le support documentaire (dont le support stable et manipulable le plus connu est la feuille de papier) ;
4. L'écriture numérique comme dynamique du calcul à même un support virtuel discret (la machine de Turing) ;

5. Enfin l'écriture diagrammatique entendue comme dynamique de réinscription « transcursive », « à même le réel³¹² », dans une pratique inventive s'opérant aux limites de l'expérience. Autrement dit, le diagrammatique désigne un régime d'écriture où l'histoire se fait à travers des inventions techniques³¹³.

3.4 Le diagramme comme expression de la distinction linguistique/graphique

L'écriture peut donc être analysée comme un médium productif de connaissances dont les diagrammes sont l'expression. Valeria Giardino a proposé dans un article publié en 2009 un schéma de classification des représentations diagrammatiques dont le fil conducteur est l'idée d'une interaction continue entre les diagrammes et le langage³¹⁴. On peut en effet voir le linguistique et le graphique comme deux plans du contenu et de l'expression qui s'entre-expriment à travers des diagrammes grâce au médium de l'écriture, ce qui permet de voir alors cette dernière de trois points de vue qui lui donnent une triple fonction :

- on peut voir l'écriture comme un instrument d'objectivation (fonction heuristique) ;
- on peut la voir comme un support d'inscription (fonction inventive) ;
- enfin on peut la voir comme un outil pour agir (fonction pragmatique).

L'idée que les formes visuelles de représentation ne sont pas seulement importantes d'un point de vue heuristique et pédagogique, mais constituent des formes élémentaires au fondement de la construction des preuves en mathématiques, a été au cœur du « projet

³¹² G. Deleuze & F. Guattari, *L'Anti-Œdipe*, Paris, Minuit, 1972/1973, p. 47.

³¹³ Dans cette mesure, l'écriture chorégraphique, l'écriture cinématographique, etc. peuvent être identifiées comme des cas particuliers d'écriture diagrammatique.

³¹⁴ V. Giardino, « Towards a Diagrammatic Classification », *The Knowledge Engineering Review*, Cambridge, Cambridge University Press, vol. 28, n° 3, 2009, p. 237-248. A. Shimojima a essayé quant à lui de dégager des critères de distinction entre un contenu formaté linguistiquement et un contenu formaté graphiquement dans l'article suivant : A. Shimojima, « The Graphic-Linguistic Distinction Exploring Alternatives », *Artificial Intelligence Review*, vol. 15, n° 1, 2001, p. 5-27.

hérétique³¹⁵» de J. Barwise et J. Etchemendy initié il y a une vingtaine d'années³¹⁶. L'idée au fondement du projet de l'école de Stanford est que le raisonnement est une activité hétérogène qui mobilise des formes non verbales de représentations.

Cependant, récuser le dogme logocentriste au profit d'une exploration légitime du paradigme visuel ne doit pas nous conduire à un excès inverse que Giardino a appelé le « dogme visuocentrique³¹⁷ » (*visuocentric dogma*) selon lequel il suffit de regarder un diagramme pour le comprendre dans la mesure où il parle directement aux yeux. La pensée verbale a été explorée en profondeur durant tout le 20^e siècle, mais la pensée visuelle commence seulement à être explorée dans sa dimension pragmatique³¹⁸, pratique³¹⁹ et opérationnelle³²⁰.

4. Reposer le problème de la différence phénoménologique dans le contexte des diagrammes

La différence entre la connaissance phénoménologique et la connaissance scientifique a été nommée par B. Bachimont « différence phénoménologique³²¹ ». Cette différence renvoie selon lui à deux types de connaissances, irréductibles les unes aux autres, bien qu'on puisse

³¹⁵ V. Giardino, « Towards a Diagrammatic Classification », art. cit., p. 238.

³¹⁶ J. Barwise & J. Etchemendy, « Visual Information and Valid Reasoning », in G. Allwein & J. Barwise (eds.), *Logical Reasoning with Diagrams*, Oxford, Oxford University Press, 1996, p. 3-25.

³¹⁷ V. Giardino, « Towards a Diagrammatic Classification », art. cit., p. 238.

³¹⁸ H. Bredekamp, *Theorie des Bildakts*, Berlin, Suhrkamp, 2010. Traduction française : H. Bredekamp, *Théorie de l'acte d'image*, Paris, La Découverte, 2015.

³¹⁹ Voir l'élaboration du concept d' « imagination manipulative » (*manipulative imagination*) dans : S. De Toffoli & V. Giardino, « An Inquiry into the Practice of Proving in Low-Dimensional Topology », in G. Lolli, G. Venturi & M. Panza (eds.), *From Logic to Practice*, Zurich, Springer International Publishing, 2015, p. 315-336 ; mais aussi V. Giardino, « L'imagination manipulative en mathématique », *Bulletin d'analyse phénoménologique*, vol. 13, n° 2, 2017.

³²⁰ Voir l'introduction du concept d' « image operative » (*operative Bilder*) par H. Farocki : A. Sissel Hoel, « Operative Image », in L. Feiersinger, K. Friedrich & M. Queisner (eds.), *Image – Action – Space: Situating the Screen in Visual Practice*, Berlin-Boston, Walter de Gruyter, 2018, p. 11-27.

³²¹ B. Bachimont, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances*, op. cit., p. 327-336.

les articuler dans le cadre d'une ingénierie : d'une part les connaissances scientifiques, exprimées dans des langages formels, où « dire, c'est calculer » (et mesurer peut-on ajouter) ; d'autre part les connaissances phénoménologiques, exprimées dans les langues naturelles, où « dire, c'est signifier³²² ».

Nous discutons le bien-fondé de cette différence, pour savoir sous quelles conditions elle peut être dépassée, non pour récuser le programme de recherche qui en a découlé³²³, mais pour le prolonger, à travers un nouveau programme philosophique, épistémologique et technologique de recherche que nous nommons, à la suite de W. J. T. Mitchell et Frederik Stjernfelt, « diagrammatologie³²⁴ ». La diagrammatologie désigne selon nous une phénoménologie de la connaissance opératoire. Elle doit être en mesure de nous donner des contenus intuitifs nouveaux : des contenus opératoires exprimés graphiquement. Cette phénoménologie de la connaissance, que C. S. Peirce appelait « *phanéroskopie*³²⁵ », s'exerce dans un espace bien particulier, celui de la surface d'inscription, qui peut tout aussi bien être une feuille de papier qu'un écran d'ordinateur³²⁶.

³²² B. Bachimont, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances*, *op. cit.*, p. 3.

³²³ Programme de recherche qui a été nommé par B. Bachimont « Artéfacture ». Voir : B. Bachimont, « L'artéfacture entre herméneutique de l'objectivité et de l'intersubjectivité : un projet pour l'intelligence artificielle », *art. cit.*

³²⁴ Une des premières occurrences du terme *diagrammatology* semble remonter à l'un des pères du tournant iconique, W. J. T. Mitchell. Voir : W. J. T. Mitchell, « *Diagrammatology* », *Critical Inquiry*, vol. 7, n° 3, The University of Chicago Press, 1981, p. 622-633. Le terme a été repris par F. Stjernfelt dans : *Diagrammatology. An Investigation on the Borderlines of Phenomenology, Ontology and Semiotics*, Springer Netherlands, 2007.

³²⁵ Pour une étude comparative synthétique des phénoménologies de la connaissance de C. S. Peirce et E. Husserl, voir : B. Bachimont, « L'artéfacture entre herméneutique de l'objectivité et de l'intersubjectivité : un projet pour l'intelligence artificielle », *art. cit.*

³²⁶ Sur les graphes existentiels de Peirce comme outils d'aide à la compréhension sémiotique et logique des écrans interactifs actuels, voir : J. Vogel, *Sémiotique de l'information chez Charles S. Peirce*, Thèse de doctorat en sémiologie, Montréal, Université du Québec à Montréal, 2014.

4.1 La première forme canonique de notre rapport au monde : la signifiante

Suivant la « différence phénoménologique », on peut se rapporter au monde de deux manières différentes par la médiation d'un langage. Or se rapporter au monde par la médiation d'un langage, c'est dire le monde. La première question sous-jacente à la différence phénoménologique est donc : comment peut-on dire le monde ? Selon le partage opéré par cette différence première, il y a deux formes canoniques au moyen desquelles le monde peut se dire : la signifiante et le calcul. La signifiante désigne de façon générique notre manière de nous rapporter au monde en usant de la langue naturelle : dans cette perspective, dire le monde, c'est le signifier. Le régime de la signifiante peut se décliner de nombreuses façons, au sens où il peut se référer à des systèmes de signes entièrement hétérogènes (langage, mythe, religion, science, etc.), ce qu'Ernst Cassirer a appelé des « formes symboliques³²⁷ ». Le régime de la signifiante ne se réduit donc pas à l'usage du langage articulé.

Les deux catégories de systèmes de signes que nous retenons pour les besoins de notre argumentation sont les suivantes : la catégorie des systèmes de signes iconiques et celle des systèmes de signes linguistiques. Dans la première catégorie, l'unité élémentaire, c'est l'image ; dans la seconde, c'est le mot. Le caractère commun à ces deux types d'unités élémentaires, c'est qu'ils se rapportent au monde suivant la modalité de la signifiante. Mais dire le monde de façon non arbitraire, cela suppose que le monde se dise, c'est-à-dire s'exprime et se manifeste. Cette expression du monde induisant la modalité signifiante comme expression véridique de notre rapport au monde suppose donc un troisième terme faisant la jointure entre le monde qui s'exprime et le système de signes qui l'exprime : ce troisième terme, la tradition philosophique l'appelle *phénomène*.

³²⁷ E. Cassirer, *La philosophie des formes symboliques* (1923-1929), Paris, Minuit, 1972. 3 vol. E. Cassirer, *La philosophie des formes symboliques. 1, Le langage*, Paris, Minuit, 1972. E. Cassirer, *La philosophie des formes symboliques. 2, La pensée mythique*, Paris, Minuit, 1972. E. Cassirer, *La philosophie des formes symboliques. 3, La phénoménologie de la connaissance*, Paris, Minuit, 1972.

Il y a en effet phénomène lorsque quelque chose du monde apparaît. Or une chose du monde qui apparaît, apparaît nécessairement à quelqu'un. Ce quelqu'un, c'est le *sujet phénoménologique*. Le sujet phénoménologique, en tant qu'il se rapporte au monde de façon signifiante par la médiation de phénomènes, passe par un médium, qui est le support des signes qu'il manipule et destine dans des actes de communication : parole vivante ou support matériel externe d'inscription, tel une tablette d'argile ou un parchemin. Lorsque l'arrangement d'un jeu de signes conduit à la reconnaissance d'une chose du monde phénoménologique par une pluralité de sujets, il y a production d'une connaissance phénoménologique. Cette connaissance permet d'accéder à un objet phénoménologique de sens commun, linguistiquement catégorisé (lorsque les signes sont des mots) ou sémiotiquement catégorisé (lorsque les signes sont par exemple des pictogrammes). Les systèmes de signes linguistiques et iconiques nous permettent ainsi d'exprimer des connaissances générales phénoménologiques à travers une activité de catégorisation des objets de notre expérience phénoménologique qui prend la forme d'énoncés linguistiques signifiants ou d'enregistrements graphiques schématiques non linguistiques. Les deux objets culturels qui symbolisent par leur existence matérielle ces deux systèmes de signes en suivant une exigence de totalisation étant le dictionnaire et l'encyclopédie. En effet la vocation du dictionnaire, c'est d'enregistrer l'ensemble des ressources linguistiques de la langue, tandis que celle de l'encyclopédie est d'enregistrer l'ensemble des connaissances, en articulant système de représentations linguistiques et système de représentations non linguistiques, à travers des planches et des schémas par exemple, ou des maquettes numériques, depuis le développement de l'informatique et des interfaces numériques.

Autrement dit, lorsque le monde est exprimé à travers le prisme d'un système de représentations linguistiques ou d'un système de représentations non linguistiques, ou d'un système de représentations qui articule les premières aux secondes, nous avons affaire à la

forme canonique de la signifiante. Cette forme canonique est productrice de connaissances phénoménologiques. En thématissant cette première forme de communication signifiante, on ouvre la possibilité d'une phénoménologie de la connaissance phénoménologique qu'on peut dès lors nommer *phénoménographie*. La phénoménographie a ainsi pour objet la description des relations entre les expressions linguistiques et les expressions schématiques. C'est donc une phénoménologie du second ordre dont l'espace de présentation est la surface d'inscription, et l'espace combinatoire, l'espace des signes. Dans cet espace combinatoire, les signes deviennent ce qu'il faut nommer des *phénoménogrammes*. Dès lors on peut distinguer *phénoménogrammes linguistiques* et *phénoménogrammes schématiques* : les premiers enregistrent le vocabulaire technique permettant de décrire les phénoménogrammes schématiques ; les seconds permettent d'enregistrer les ressources cognitives visuelles du monde phénoménologique, ses saillances, prégnances et régularités perceptives, grâce à des pictogrammes plus ou moins standardisés.

Lorsque Netz a fait l'histoire cognitive de la mise en forme de la déduction dans les mathématiques grecques³²⁸, il a montré que c'est l'articulation de ces deux types de ressources cognitives qui a été au principe de la construction des diagrammes grâce auxquels ont été opérées les premières productions théorématiques, fondées sur le transfert de nécessité. Ce transfert, on peut le reformuler dans les termes de la philosophie de Gilbert Simondon et dire qu'il s'agit d'une *transduction* contrôlée sur des symboles³²⁹, car la transduction est une opération fondée sur la saisie de relations transitives, donc de relations d'équivalence³³⁰. Par transduction contrôlée, nous entendons l'actualisation analogique par

³²⁸ R. Netz, *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics: A Study in Cognitive History*, Cambridge, Cambridge University Press, 1999.

³²⁹ G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit., p. 175, n. 2.

³³⁰ Voir : G. Simondon, « Allagmatique », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 529-536.

un lecteur d'une opération capturée dans un système de signes iconiques qui en exhibe le schème de fonctionnement irréductible. L'opération transductive correspond à l'actualisation d'une essence opératoire saisissable par un sujet interprétant dans un acte de réinvention. En effet, c'est par transduction contrôlée que Shannon a traduit concrètement les fonctions logiques de l'algèbre booléenne en portes logiques dans les circuits électroniques.

Le problème qui se pose est le suivant : qu'est-ce qui fait qu'un assemblage de signes linguistiques ou non linguistiques est l'expression d'une connaissance phénoménologique ? Comment la transcription phénoménographique d'un donné phénoménologique sous une forme idéogrammatique ou pictogrammatique conduit-elle à l'obtention d'un résultat scientifique pouvant être calculé théoriquement et mesuré expérimentalement ?

L'essence de ce problème est celui de la représentation, celui du lien qui unit un signe à ce qu'il signifie. C'est aussi celui de la manipulation de la suite de traces grâce auxquelles on passe d'un signifiant originel à son signifié en acte, tel qu'il se donne dans la plénitude d'une expérience événementielle indubitable et même cruciale³³¹. Notre hypothèse de travail est que le dépassement de la différence phénoménologique doit passer par une théorie de la transduction contrôlée, c'est-à-dire par une théorie de la connaissance analogique validée par des critères permettant de distinguer l'usage heuristique de l'analogie de son usage rhétorique³³². Cette théorie se fonde sur un seul postulat ontologique, consistant à donner une valeur d'être à la relation³³³. En donnant une valeur ontologique à la relation de façon explicite, on se donne comme postulats la réflexivité et l'analogicité du réel. Si la relation

³³¹ Sur cette question, voir : G. Wallet & S. Neuwirth, « Enquête sur les modes d'existence des êtres mathématiques », *Philosophia Scientiae*, 2019, vol. 23, n° 3, p. 83-108.

³³² F. Ferri, « Technique, science, philosophie : les conditions d'exercice de l'analogie valide », *Philosophique* 2017, art. cit., p. 79-94.

³³³ Ce postulat métaphysique est nommé « réalisme des relations » et prend sa source dans l'ontologie et l'épistémologie bachelardiennes. Sur cette question, voir : J.-H. Barthélémy, *Simondon ou l'encyclopédisme génétique*, op. cit., chap. 1 ; ou encore : J.-H. Barthélémy & V. Bontems, « Relativité et réalité. Nottale, Simondon et le réalisme des relations », *Revue de synthèse*, vol. 122, n° 1, janv.-mars 2001, p. 27-54.

« a valeur d'être » comme l'écrit Simondon, alors la relation entre deux relations a elle-même valeur d'être, donc l'analogie a valeur d'être. Pour que l'intuition d'une telle relation, entendue comme saisie intelligible dans un acte de compréhension irréductible à un acte d'interprétation d'un énoncé linguistique signifiant, ait elle-même valeur d'être, il faut donc qu'elle soit elle-même une relation. L'intuition analogique est donc la relation qui rend possible la saisie de la relation entre deux relations.

Le « jugement par perception intuitive » dont parlait Goethe³³⁴ désigne selon nous une telle saisie analogique réelle. Cette saisie correspond à l'analogie réelle entre le devenir du sujet connaissant et le devenir des objets connus qu'il met en relation dans le processus de recherche et d'apprentissage qu'il met en œuvre. Elle correspond à la saisie simultanée : 1° de l'*analogie opératoire* entre deux relations objectives ; 2° de l'opération analogique faite par le sujet connaissant au cours de la morphogenèse adaptative de son processus d'apprentissage s'opérant à même l'expérience qui l'informe et le transforme. Le jugement par perception intuitive dont parlait Goethe serait donc une analogie entre au moins trois opérations : deux opérations objectives et une opération subjective, dont un système d'inscriptions diagrammatique permet d'exhiber l'« équivalence transopératoire³³⁵ ». Autrement dit, un système d'inscriptions présentant des rapports iconiques et dont la manipulation conduit à la mise en fonctionnement d'une machinerie sémiotique correspond selon nous à l'enregistrement de la connaissance opératoire saisie par intuition analogique. L'appropriation de l'inscription correspondant, en tant qu'acte d'interprétation opératoire, à la mise en œuvre du faire sens de cette inscription, à travers une action efficace située en contexte, autrement dit au moyen d'une opération pratique succédant à l'interprétation de cette inscription.

³³⁴ J. W. von Goethe, « Anschauende Urteilskraft », *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, *op. cit.*

³³⁵ G. Simondon, « Allagmatique », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 531.

En couplant ces postulats ontologiques simondoniens aux principes de la sémiotique de Peirce, notre hypothèse est que le schématisme morphogénétique à l'œuvre dans le cadre d'une ontogenèse relationnelle (morphogénèse) équivaut au schématisme diagrammatique à l'œuvre dans le cas d'une genèse théorématique (accroissement de la connaissance apodictique). Si une telle hypothèse venait à être vérifiée, elle confirmerait et expliciterait l'intuition de Goethe selon laquelle il existe un « jugement par perception intuitive » (*Anschauende Urteilskraft*) saisissant la signification de totalités organiques au-delà du périmètre du calculable, exhibant ainsi des gestes qui ne possèdent pas de formalisation algorithmique (passage à la limite, récurrence transfinie, etc.).

L'enjeu théorique du programme de la diagrammatologie est donc celui du statut scientifique de la connaissance, dont la question directrice est celle de savoir dans quelle mesure science et connaissance peuvent s'unir dans un langage et une écriture qui leur sont communs. Son enjeu pratique est celui de l'apprentissage de savoir-faire au sens fort, à travers une activité de lecture et d'écriture diagrammatiques.

Revenons à la différence phénoménologique. Cette différence part du constat que les catégories de la langue et les phénomènes de la conscience³³⁶ ne sont pas réductibles à des mesures et à des lois mathématiques qui en fourniraient des modèles d'observation et d'explication sous une forme équationnelle ou algorithmique. Elle sépare donc deux types d'objectivité : l'« objectivité phénoménologique » et l'« objectivité scientifique³³⁷ ». L'objectivité scientifique s'exprime dans les connaissances scientifiques. Ces connaissances s'écrivent dans les langages formels de la science, qui permettent de légaliser et de quantifier les régularités du réel au moyen de la notation symbolique ; les phénomènes étant capturés expérimentalement par des opérations de mesure. C'est donc la métrologie comme technique

³³⁶ B. Bachimont, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances*, op . cit., p. 233.

³³⁷ *Ibid.*, p. 5.

et science de la mesure qui fait le lien entre le monde de la grandeur physique où se produisent les phénomènes naturels (étudiés par les sciences expérimentales) et les modèles théoriques élaborés pour expliquer ces phénomènes. L'objectivité phénoménologique s'exprime quant à elle dans les connaissances véhiculées à travers les systèmes sémiotiques, qui ne sont pas réductibles aux seules expressions linguistiques.

D'une certaine manière, on peut dire que l'histoire de la différence phénoménologique est l'histoire de l'épistémologie entre science et ontologie. C'est l'histoire du fondement de la science entre cumulativité de la connaissance positive et réflexivité de la connaissance philosophique. Autrement dit, cette histoire commence avec Aristote : elle passe par ces jalons incontournables que sont Descartes, Leibniz, Kant, Husserl. Poser la question du dépassement de la différence phénoménologique suppose d'avoir bien identifié au préalable les termes de la différence. Cette différence, c'est celle entre le catégorial et le calculatoire. Or le paradigme de la logique catégoriale nous est donné par la logique aristotélicienne, qui est la science de l'objectivité phénoménologique. Que fait-elle essentiellement ? Elle systématise les connaissances en catégories³³⁸. En revanche, le paradigme de la logique calculatoire nous est donné par la logique mathématique, dont on peut situer l'acte de naissance dans l'œuvre de Boole et plus généralement dans le réseau des algébristes britanniques du 19^e siècle, sur lequel on dispose maintenant de nombreuses connaissances historiques³³⁹.

³³⁸ B. Bachimont, *ibid.*, p. 249.

³³⁹ Pour des études approfondies sur le réseau des algébristes britanniques du 19^e siècle, voir les travaux de M.-J. Durand-Richard.

4.2 De la signifiante au calcul : brève histoire de la différence phénoménologique

Pendant presque deux mille ans, on a tenu le système aristotélien des formes valides de déduction pour complet en pensant qu'il n'était pas possible de l'améliorer. Le renouveau des études logiques à l'époque moderne est dû à Boole grâce au développement de l'algèbre de la logique. Comprendre comment on passe de la logique d'Aristote à la logique contemporaine, c'est comprendre comment on passe d'une logique empirique fondée sur la perception et l'usage du langage naturel à une logique formelle. C'est comprendre comment on passe d'une logique qu'on peut qualifier de « catégoriale » (dans la mesure où elle ordonne les contenus de la perception en catégories de la langue qui enregistrent et organisent ces contenus à travers la technique de l'écriture alphabétique) à une logique formelle qui n'est plus simplement une idéalisation de la syntaxe³⁴⁰ ordonnant ces contenus de nature phénoménologique à travers des règles logico-grammaticales, mais à travers un langage algébrique réglé par des lois de combinaison nous obligeant à faire abstraction du sens des signes manipulés pour ne prêter attention qu'à leur forme symbolique et aux lois qui contraignent leur manipulation.

L'algébrisation de la logique est ce qui a initié le développement de la logique dite symbolique, dont l'essence est d'être un calcul opérant sur des symboles généraux, à la différence de la logique catégoriale, dont les règles syntaxiques ne valent que pour des idiomes particuliers³⁴¹. La différence entre logique catégoriale et logique algébrique est celle qui nous permettra de distinguer une logique régie par des règles variables (logique grammaticale) d'une logique régie par des lois uniformes (logique calculatoire). Tout l'enjeu de l'écriture diagrammatique est de savoir s'il est possible de réconcilier ces deux approches de la logique (logique ancienne versus logique contemporaine, logique catégoriale versus

³⁴⁰ Par idéalisation de la syntaxe, nous entendons la formalisation des règles logico-grammaticales de la langue telle qu'elle est prise comme objet d'étude logique.

³⁴¹ Idioms : instrument de communication linguistique utilisé par une communauté.

logique calculatoire, etc.) dans une nouvelle approche qu'on pourrait alors qualifier de « compositionnelle ».

La logique catégoriale fondée sur le donné phénoménologique peut-elle épouser la logique mathématique fondée sur la formalité, le calcul et la mesure ? Si oui, comment le peut-elle et sous quelles conditions ? Ce problème est celui de la coïncidence non arbitraire entre une objectivité perçue et une objectivité réelle, entre une objectivité phénoménologique et une objectivité physico-mathématique. Dans l'histoire de la différence, le moment cartésien est celui où l'opération du doute vient remettre en question le donné phénoménologique, objectivé et systématisé dans le canon de la logique aristotélicienne et explicité dans les contenus linguistiques des langues écrites³⁴². La généralisation de ce doute, dans sa pratique hyperbolique, conduisant Descartes à l'appliquer non seulement aux contenus transmis par la tradition³⁴³, mais aussi à toute donnée immédiate de la conscience³⁴⁴.

Dans la mesure où la notion de symbole physique permet d'introduire une dimension spatiale dans le donné phénoménologique, une naturalisation du donné devient envisageable, si le donné correspond au résultat d'un calcul symbolique sur des représentations et si réciproquement ce calcul correspond à une physique matérielle des symboles, donc à une mécanique symbolique. C'est l'hypothèse leibnizienne de la mathématique universelle, solidaire de la métaphysique monadologique et du système de l'harmonie préétablie. Dans cet horizon métaphysique, l'univers est une immense machine computationnelle dont Dieu est l'ingénieur et la logique événementielle est un calcul des prédicats monadologiques. *Mathesis universalis* veut alors dire : les mathématiques équivalent à l'ontologie³⁴⁵. Dire l'être

³⁴² La doxographie scolastique ayant été garante de la vérité préscientifique transmise à travers les siècles antérieurs à la révolution galiléo-cartésienne.

³⁴³ R. Descartes, *Discours de la méthode (suivi de) La dioptrique, Les météores et La géométrie...*, Paris, Gallimard-Tel, 2009.

³⁴⁴ R. Descartes, *Méditations métaphysiques (suivi de) Objections et réponses, I à VI*, Paris, Gallimard-Tel, 2018.

³⁴⁵ G. W. Leibniz, *Mathesis universalis, op. cit.*

suppose de maîtriser un langage universel qui est celui des mathématiques (*lingua characteristica universalis*). Autrement dit, c'est Leibniz qui permet d'arriver à la seconde forme canonique au moyen de laquelle ce n'est pas seulement le *monde*, mais l'*univers* qui se dit : cette forme canonique est le calcul. La caractéristique universelle de Leibniz est le système de notation rêvé permettant l'entre-expression de la pensée des choses et des choses pensées par la médiation des caractères expressifs, dans la proportion de leurs rapports internes essentiels.

Refusant l'harmonie préétablie de Leibniz, la philosophie kantienne est une recherche de la médiation entre la pensée et le réel suivant la méthode transcendantale³⁴⁶. Le problème devient le suivant : comment la vérité peut-elle se voir sans être immédiatement évidente et sans pour autant être médiatisée par la déduction logique ? Il faut passer par un type de déduction conduisant à l'intuition d'une vérité au terme d'une synthèse objectivante. Pour Kant, ce type d'inférence est celui que mettent en œuvre les mathématiciens dans leur pratique, car les mathématiques résolvent selon lui le problème d'opérer une synthèse universelle dans la contingence empirique, dans la mesure où elles portent sur les opérations de construction productrices des connaissances synthétiques *a priori*, c'est-à-dire universelles, nécessaires et donatrices d'objets unifiés pouvant être rencontrés dans l'expérience réelle. Autrement dit, sortir de la métaphysique, c'est distinguer le contenu linguistique d'une notion de son contenu scientifique, son contenu analytique (logique) de son contenu synthétisé (mathématique). Cela signifie qu'à partir de Kant, le logique définit le *pensable*, alors que le mathématique définit le *pensé*, c'est-à-dire le contenu réel de la science comme objet de synthèse répétable. Peut-on concilier l'inconciliable, c'est-à-dire les termes de la différence phénoménologique, sans commettre de paralogisme ?

C'est là qu'il faut dissiper une confusion et ne pas assimiler le calcul symbolique à une

³⁴⁶ E. Kant, *Critique de la raison pure*, *op. cit.*

mécanisation de la pensée. Car le calcul est une opération symbolique effectuée par l'esprit qui interprète et non une procédure physique effectuée par la nature. En effet le calcul est mis en œuvre par une puissance interprétative qui manipule des signes porteurs de sens alors que le mécanisme opère sur des signes matériels dépourvus de significations³⁴⁷. Par conséquent, ce n'est pas la pensée qui est une opération de calcul, mais le calcul qui est une opération de la pensée. Tout l'enjeu étant de savoir quel supplément enrôle avec elle l'opération de pensée supra-calculatoire. C'est la question que posait Heidegger au semestre d'hiver 1951-1952³⁴⁸, peu de temps après la publication de l'article séminal de Turing, qui signalait l'acte de naissance de l'intelligence artificielle³⁴⁹.

Pour que cette opération de la pensée soit congruente à une opération de la nature, il faut reposer le problème du schématisme en des termes nouveaux, pour être en mesure de mettre au jour « l'art caché des profondeurs de l'âme humaine³⁵⁰ » dont parlait Kant dans la première *Critique*, et faire d'une opération de la pensée une opération de la nature dont la schématisation n'est pourtant pas « légalisable » par un algorithme. Or telle est la fonction des représentations diagrammatiques selon nous : schématiser de manière non algorithmique une finitude non calculable.

Pour échapper au parallogisme, il faut réussir à montrer comment les catégories de la pensée possèdent un contenu phénoménologique, correspondant à une expérience vécue par la conscience, c'est-à-dire un contenu intentionnel. Or un vécu est intentionnel lorsqu'il porte sur quelque chose, c'est-à-dire lorsque la conscience accède à un objet. C'est la tentative de la phénoménologie husserlienne, pour laquelle l'objet n'existe pas en dehors de l'acte qui le vise. Le but de la phénoménologie husserlienne a été de constituer l'objectivité réelle de la

³⁴⁷ E. Husserl, *Articles sur la logique*, op. cit.

³⁴⁸ E. Hörl, « La destinée cybernétique de l'occident. McCulloch, Heidegger et la fin de la philosophie », *Appareil*, 1 | 2008.

³⁴⁹ A. M. Turing, « Computing Machinery and Intelligence », *Mind*, vol. LIX, n° 236, 1950, p. 433-460.

³⁵⁰ E. Kant, *Critique de la raison pure*, op. cit., p. 226.

science à partir d'une phénoménologie de la conscience en fondant la science à partir de l'intentionnalité. Alors que Kant a réduit la Nature aux phénomènes en fondant dans les structures transcendantales du sujet la connaissance scientifique, Husserl a réduit le Monde à un phénomène visé suivant les modalités intentionnelles d'une subjectivité incarnée. Dans sa distinction entre essence phénoménologique obtenue par idéation et idées scientifiques obtenues par idéalisation, Husserl a thématiqué la différence phénoménologique³⁵¹. Les premières sont anexactes car déterminées linguistiquement par une opération de catégorisation ; les secondes sont exactes car légalisées mathématiquement. La différence phénoménologique est donc chez Husserl la différence entre le monde de la vie décrit par nos langues naturelles et le monde de la science décrit par le langage mathématique. En fondant la réduction phénoménologique comme méthode, Husserl a élaboré une objectivité de la conscience différente de l'objectivité kantienne en montrant que les phénomènes de la conscience ont une essence et non une nature. Mais la phénoménologie husserlienne a échoué, dans la mesure où elle n'a pas été capable de penser l'invention, c'est-à-dire la genèse des structures eidétiques, autrement dit l'historicité de la raison³⁵². Malgré cet échec, elle a toutefois donné une stratégie cognitive féconde pour aborder la différence phénoménologique ; Kant ayant fourni quant à lui une stratégie épistémologique.

En mettant en œuvre d'une part une stratégie transcendantale d'inspiration kantienne visant à produire une philosophie de l'informatique ; d'autre part une stratégie cognitive d'inspiration husserlienne visant à produire une phénoménologie de la connaissance, Bruno Bachimont a réussi à démontrer³⁵³ : 1° que l'informatique est une science de la nature qui a le calcul comme objet matériel (thèse 1) ; 2° que toute connaissance ne se constitue que par

³⁵¹ Husserl, *Idées directrices pour une phénoménologie pure et une philosophie phénoménologique*, Paris, Gallimard, 2018.

³⁵² R. Boirel, *Théorie générale de l'invention*, Paris, Presses universitaires de France, 1961, p. 60-61.

³⁵³ B. Bachimont, *Herméneutique matérielle et Artéfacture*, *op. cit.*

la médiation d'une inscription matérielle dont elle est l'interprétation (thèse 2). Parce que le calcul est un objet matériel, il représente un nouveau support d'inscription des connaissances dont l'opérationnalisation computationnelle dans les dispositifs informatiques autorise, au sens phénoménologique du terme, la constitution de nouvelles connaissances, ouvrant ainsi le projet de ce que Bachimont a nommé une « herméneutique matérielle ». Ce projet a trouvé son fondement théorique dans une théorie matérielle de la connaissance – la théorie du support – et sa réalisation concrète dans l'accomplissement d'une critique de la raison computationnelle³⁵⁴.

Dépasser la différence phénoménologique ne signifie pas la nier, car l'histoire de la différence montre qu'une telle négation fondée sur un optimisme épistémologique conduit à un paralogisme. Dépasser la différence ne pourra se faire qu'en trouvant un point de contact entre monde de la vie et monde de la science, langue naturelle et langue formelle artificielle scientifique, permettant de réarticuler les termes de la différence, plutôt que de les assimiler. Un tel point de contact existe : c'est la notion de symbole ou de forme symbolique, telle que nous en héritons de Cassirer³⁵⁵.

Dans la mesure où la science est aussi un langage, elle doit avoir un fonctionnement herméneutique. La communauté herméneutique des langages formels et des langues naturelles, c'est en effet qu'ils élaborent des réponses à des problèmes. Dire, c'est n'est donc pas seulement signifier et calculer, c'est aussi échanger comme on peut le faire dans une conversation : dire, c'est alors argumenter pour convaincre l'autre, au-delà de la différence phénoménologique, dans l'élément herméneutique de l'échange intersubjectif.

³⁵⁴ Un abrégé de la théorie du support se trouve dans le mémoire suivant : B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique, op. cit.*, p. 61-117.

³⁵⁵ J. Lassègue, *Cassirer, du transcendantal au sémiotique*, Paris, J. Vrin, 2016.

5. Conclusion

Nous pensons que la matérialité symbolique des diagrammes constitue un milieu apte à favoriser le développement d'une nouvelle activité herméneutique, mixte d'herméneutique formelle de l'objectivité³⁵⁶ et d'herméneutique informelle de l'intersubjectivité. Nous nommons cette activité herméneutique sémiotique effectuée à même les diagrammes *herméneutique opératoire*. Nous parlons d'herméneutique opératoire au sens où le faire est l'interprétation du signe (herméneutique) et où le signe est l'expression d'une opération (opératoire). L'enjeu de la phénoménographie consiste ainsi à mettre en forme les notations grâce au design graphique pour rendre possible un accès rapide et efficace aux contenus opératoires des diagrammes ; l'enjeu de l'herméneutique opératoire étant l'appropriation des schèmes opératoires dont sont porteurs les diagrammes et leur actualisation analogique lors de l'exécution diagrammatique.

Le principe du dépassement de la différence phénoménologique est fourni par Peirce. En effet, si tout interprétant sémiotique est de nature iconique dans la mesure où sa structure formelle internalise la relation de correspondance entre un signe et son objet, alors le développement d'une écriture diagrammatique peut permettre d'articuler sur un même plan sémiotique le catégorial et le calculatoire avec comme critère de convergence le caractère iconique des langages formels et des langues naturelles, c'est-à-dire leur caractère analogique. Une première écriture diagrammatique nous a été donnée par les graphes existentiels de Peirce³⁵⁷, et plus récemment par les graphes conceptuels de Sowa³⁵⁸. Posé dans les termes de la pensée diagrammatique, le problème du schématisme tel que nous en héritons depuis Kant est selon nous un problème de design de l'information³⁵⁹ visant à véhiculer un contenu de

³⁵⁶ Cf. J.-M. Salanskis, *L'herméneutique formelle* (1991), Paris, Klincksieck, 2013.

³⁵⁷ D. D. Roberts, *The Existential Graphs of Charles S. Peirce*, Mouton, The Hague, 1973.

³⁵⁸ J. F. Sowa, *Conceptual Structures*, Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 1984.

³⁵⁹ A.-L. Renon, *Design & Sciences*, Saint-Denis, Presses Universitaires de Vincennes, 2020.

connaissance opératoire qui n'est pas réductible à une opération de calcul et dont l'écriture diagrammatique est le mode d'expression privilégié.

BILAN DU CHAPITRE 7

Aux trois structures de la raison graphique de Goody (liste, tableau, formule) et de la raison computationnelle de Bachimont (programme, réseau, couche), on peut en ajouter une septième, le diagramme, dont la plus vieille figure systématique est le carré dit d'Apulée, qui représente les relations d'opposition entre propositions théorisées par Aristote (voir Figure 2). Le diagramme, structure graphique permettant de visualiser les relations systématiques entre les parties d'une totalité grâce à un schéma synoptique, est une des matrices de la pensée structuraliste³⁶⁰. Il traverse toute la pensée philosophique et scientifique occidentales, d'Aristote à Descola, en passant par les médiévaux et les penseurs structuralistes du carré sémiotique³⁶¹. Ce que nos analyses précédentes ont confirmé, c'est que le diagramme est d'abord et avant tout la matrice générative de la pensée opératoire dans l'histoire de l'écriture conçue comme une technologie cognitive.

³⁶⁰ S.-D. Kim, « La raison graphique de Saussure », *Cahiers Ferdinand de Saussure*, n° 61, Librairie Droz, 2008, p. 23-42.

³⁶¹ M. Bocquet, « Prénance du carré sémiotique ou la trace de l'homme : une anthropologie », *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, n° 11, Société Française de Sciences de l'Information et de la Communication, 2017.

PLAN DU CHAPITRE 8

Ce chapitre³⁶² est une argumentation qui plaide en faveur du raisonnement analogique comme constituant une méthode de découverte rationnelle tout autant qu'une méthode d'invention dès lors qu'on l'exerce suivant des conditions bien spécifiées, dans certaines limites et en suivant certaines contraintes.

³⁶² Ce chapitre est une reprise et un enrichissement de l'article suivant : F. Ferri, « Technique, science, philosophie : les conditions d'exercice de l'analogie valide », *Philosophique* 20 | 2017, art. cit.

CHAPITRE 8. LA METHODE ANALOGIQUE

1. Introduction

Existe-t-il une méthode qui permettrait à l'enquête philosophique de bénéficier des avancées scientifiques et techniques, et qui, inversement et en retour, dans un cercle vertueux, permettrait aux sciences et aux techniques de bénéficier du mode de connaissance philosophique ? Y-a-t-il une méthode permettant de circuler, sans les confondre, entre ces régimes de rationalité que sont la pensée technique, la pensée scientifique et la pensée philosophique, pour les faire entrer dans un dialogue qui les entre-féconde ?

Notre hypothèse est que la méthode de pensée analogique est en mesure d'opérer une communication encyclopédique entre technique, science et philosophie dès lors qu'elle s'exerce dans certaines conditions, dans certaines limites et suivant certaines contraintes. Cette méthode permet de surmonter deux obstacles. Premièrement l'usage de la métaphore dans le discours philosophique. L'enjeu de ce premier point est celui de la détermination d'un critère de démarcation rigoureux entre littérature et philosophie. Car la méthode analogique permet de sauver la noblesse esthétique voire pédagogique de la métaphore tout en préservant la philosophie des sophismes. Elle permet deuxièmement de surmonter le scientisme d'un discours réductionniste. L'enjeu de ce second point est celui de la détermination d'un critère de démarcation entre science et philosophie. Nous nous attacherons à déterminer les critères respectifs de la ressemblance et de l'analogie pour justifier l'usage de la méthode analogique comme pouvant être constitutif d'un raisonnement valide et valable.

On sait que certains abus de la rhétorique de penseurs postmodernes ont conduit à la publication de deux ouvrages polémiques à la fin des années 1990, le premier écrit par Alan Sokal et Jean Bricmont³⁶³, le second par Jacques Bouveresse³⁶⁴. Nous pensons que ces

³⁶³ A. Sokal et J. Bricmont, *Impostures intellectuelles*, Paris, Odile Jacob, 1997.

³⁶⁴ J. Bouveresse, *Prodiges et vertiges de l'analogie*, Paris, Raisons d'agir, 1999.

ouvrages étaient portés vers le versant toxique de cet opérateur épistémologique qu'est l'analogie, et que leurs auteurs ont oublié d'en analyser le versant curatif, face à ces virus de la pensée que sont les discours amphigouriques, les sophismes et les mimétismes pseudo-savants. Pourquoi ? Parce qu'un philosophe pourtant rigoureux comme Bouveresse assimile métaphore et analogie, et donc n'arrive pas à distinguer la mauvaise analogie de la bonne analogie.

Si l'analogie s'oppose à la métaphore, en quoi consiste la négativité épistémologique de la métaphore ? Quel est son principe génétique ? En quoi constitue-t-elle un principe de méconnaissance pouvant avoir des conséquences fâcheuses ? Inversement, en quoi consiste alors la positivité épistémologique de l'analogie ? En quoi l'analogie peut-elle constituer un principe de progression épistémique ? Dès lors, comment la méthode analogique, d'abord heuristique, peut-elle se systématiser en méthode de découverte pour enfin se poser en principe de circulation encyclopédique ?

1.1 La mise en forme de la méthode analogique

L'analogie a un triple statut. Elle circonscrit tout d'abord un rapport d'intelligibilité au monde dans la mentalité technique³⁶⁵. Elle définit ensuite une méthode de découverte au fondement de la pensée scientifique. Elle désigne enfin un mode de connaissance valable, distinct de la connaissance opératoire et de la connaissance théorique : l'intuition philosophique³⁶⁶. Elle doit donc pour ces trois raisons être en mesure de nous donner un moyen d'articuler la théorie de l'action, la théorie du savoir et l'ontologie, afin d'établir les rapports rigoureux et valables entre technique, science et philosophie.

³⁶⁵ G. Simondon, « Mentalité technique », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, vol. 131, n° 3, 2006, p. 343.

³⁶⁶ Cette thèse est développée par Simondon dans la troisième partie de *Du mode d'existence des objets techniques*, nouvelle édition revue et corrigée, Paris, Aubier, 2012, p. 321-325.

Il faut montrer en quoi l'analogie se présente comme un instrument d'appréhension technique, un procédé de découverte scientifique et une nouvelle méthode philosophique donnant accès : 1° à des représentations du monde qui nous permettent de nous y insérer (aspect technique), de nous y situer (aspect scientifique) et de nous y orienter (aspect philosophique) ; 2° à des connaissances certaines (aspect scientifique) qui sont des solutions réelles devant nous permettre d'agir (aspect technique) en dépassant nos rapports problématiques au monde dans une conquête de l'autonomie (aspect philosophique).

La méthode analogique est en effet au fondement de la philosophie occidentale. C'est elle qui a permis à Platon d'édifier un système d'intelligibilité du réel dans sa totalité. Elle est d'ailleurs contemporaine de la naissance de la science mathématique, reconnue comme étant donatrice de la connaissance éminemment valable. La philosophie l'a mimée à la fois dans sa stratégie rhétorique, celle du transfert de nécessité dans le raisonnement démonstratif (*ἀπόδειξις*) et dans son « style de raisonnement » (Hacking), analogique, afin de chasser les sophistes de la cité. C'est de cette façon que la philosophie naissante appliquait tacitement la méthode des mathématiciens à tous les types de contenus (politiques, moraux, esthétiques, etc.), et pas simplement à la forme, comme c'était le cas des mathématiques grecques³⁶⁷.

Le statut de la méthode analogique ressurgit en pleine querelle des universaux, avec Abélard en particulier³⁶⁸. C'est elle qui amorcera le développement des sciences

³⁶⁷ Sur ces questions voir: R. Netz, *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics*, *op. cit.* Pour un compte rendu des thèses de Netz, voir : Bruno Latour, « Un livre de Reviel Netz pour une approche non formaliste des formalismes », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2009, vol. 3, n° 2, p. 185-206. George Lakoff et Rafael Núñez ont montré que les structures invariantes dégagées par les mathématiques procédaient en réalité de la lente formalisation et de la longue stabilisation de mappages originellement métaphoriques : ce qui permet de réinscrire les mathématiques dans une genèse plus large, au-delà des analyses de Netz. Pour un résumé des thèses de Lakoff et Núñez, voir : A. Gualandi, *L'œil, la main et la voix : une théorie communicative de l'expérience humaine*, Paris, Hermann, 2014, p. 279-303.

³⁶⁸ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 84 : « Abélard a pleinement aperçu la possibilité de séparer la connaissance des termes de la connaissance de la

expérimentales, en détournant l'attention nominaliste aux termes de la relation vers sa réalité en tant que telle, procédé qu'on trouve déjà à l'œuvre dans la méthode logique d'inspiration platonicienne, comme en témoigne l'exemple du *Sophiste*³⁶⁹. En effet, en faisant abstraction de la nature des termes qu'elle met en rapport au profit du dynamisme transformateur de leur interaction concrète, la méthode platonicienne permettait de dégager des invariants opératoires :

$$\frac{\text{Sophiste}}{\text{Jeunes gens riches}} \equiv \frac{\text{Pêcheur à la ligne}}{\text{Poissons}}$$

L'opération de séduction du sophiste et l'opération de capture fructueuse du pêcheur à la ligne se révèlent être équivalentes. C'est encore la méthode analogique qui inspirera Descartes pour résoudre des problèmes de géométrie grâce à la formalisation algébrique opérée au moyen de la notation équationnelle, comme nous l'avons vu dans le troisième chapitre³⁷⁰. La fécondité d'une telle méthode se poursuivra dans l'élaboration de la relativité einsteinienne, comme l'avait remarqué et analysé Bachelard³⁷¹. Dans les percées les plus

relation ; malgré les railleries incompréhensives dont il a été l'objet, il a apporté par cette distinction un principe extrêmement fécond, qui prend tout son sens avec le développement des sciences expérimentales : *nominalisme* pour la connaissance des termes, *réalisme* pour la connaissance de la relation, telle est la méthode que nous pouvons retirer de la doctrine d'Abélard pour l'appliquer en l'universalisant. »

³⁶⁹ G. Simondon, *Allagmatique*, « Théorie de l'acte analogique », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 532.

³⁷⁰ Sur ces questions, voir par exemple : M. Serfati, *La révolution symbolique : la constitution de l'écriture symbolique mathématique*, op. cit.

³⁷¹ G. Bachelard, *La valeur inductive de la relativité*, Paris, J. Vrin, 1929, p. 98 : « La Relativité s'est [...] constituée comme un franc système de la relation. Faisant violence à des habitudes (peut-être à des lois) de la pensée, on s'est appliqué à saisir la relation indépendamment des termes reliés, à postuler des liaisons plutôt que des objets, à ne donner une signification aux membres d'une équation qu'en vertu de cette équation, prenant ainsi les objets comme d'étranges fonctions de la fonction qui les met en rapport. »

récentes de la géométrie non commutative accomplies par Connes, c'est encore cette méthode qui est à l'œuvre³⁷².

1.2 De l'analogie mathématique à l'analogie technologique

La structure formelle de l'analogie la plus simple est celle d'une *identité de rapports* découverte entre au moins quatre termes. L'exemple le plus simple peut être donné dans le cas du calcul d'une quatrième proportionnelle. Soit A , B , C , D des quantités. Si :

$$\frac{A}{B} = \frac{C}{D},$$

Et que l'on connaît A , B et C , alors on peut calculer D :

$$D = \frac{BC}{A}.$$

³⁷² En construisant la mécanique matricielle, Werner Heisenberg a montré que les nombres quantiques (*q-numbers*) permettent de décrire la manière dont se produisent les sauts quantiques en interprétant les propriétés physiques des particules comme des matrices qui évoluent dans le temps. Or ces nombres ne commutent pas entre eux. En introduisant le concept de topos dans le *Séminaire de Géométrie Algébrique*, Grothendieck donnera un cadre homogène pour penser la coexistence du continu (géométrie) et du discret (arithmétique), ouvrant ainsi la voie à l'exploration d'une véritable géométrie arithmétique. Or il s'avère que la géométrie non commutative développée par Connes (ou géométrie spectrale) est en accord avec la mécanique quantique, et donne un cadre mathématique qui permet de penser la coexistence entre des variables discrètes et des variables continues, grâce à la théorie des opérateurs. L'algèbre des coordonnées dans l'espace des phases n'étant plus commutative, on arrive, grâce aux algèbres d'opérateurs de la géométrie non commutative, à retrouver les analogues quantiques des variables réelles, des infinitésimaux, de l'intégrale et de l'élément de longueur d'un espace classique : opérateurs auto-adjoints, opérateurs compacts, trace de Dixmier et propagateur des fermions en sont les équivalents dans l'espace quantique. Or Connes s'est rendu compte après avoir développé la cohomologie cyclique au début des années 1980 (qui remplace la cohomologie standard dans le cadre non commutatif) que la catégorie cyclique était en fait un topos, nommé topos cyclique, et que toute l'artillerie conceptuelle et mathématique dont il avait besoin était en fait déjà contenue dans le 4^e tome du *Séminaire de Géométrie Algébrique*, c'est-à-dire dans la théorie des topos de Grothendieck. Ce qui démontre bien que la théorie des catégories n'est pas de l'ordre de l'*abstract nonsense*.

Cette identité de rapports peut aussi concerner des situations, comme l'avait remarqué Simondon : « Une situation peut être dite *équivalente* à une autre quand le même geste technique modifie ces situations de la même manière³⁷³ ». C'est pourquoi il y a analogie entre le rapport que la cybernétique entretient à l'ensemble des sciences objectives empiriques et le rapport que l'algèbre entretient à l'ensemble des autres branches des mathématiques (arithmétique, géométrie, topologie, etc.). Car l'algèbre se présente comme une puissante *technologie graphique* permettant de dégager des équivalences entre des situations mathématiques qui au premier regard semblent totalement étrangères les unes aux autres. Elle le permet en rendant possible l'abstraction de la nature des objets qu'elle étudie, pour dégager les identités de rapports opératoires entre des situations mathématiques différentes. Elle favorise la direction de l'attention sur les opérations techniques formelles qui réalisent les mêmes transformations, et donc modifient de la *même* façon des objets de nature *différente*. En ce sens, l'algèbre porte en elle la « technologie réflexive » (Simondon) des mathématiques, dont on a commencé à prendre conscience avec le développement de la théorie des groupes³⁷⁴, et qui s'est révélée dans toute sa lumière avec l'avènement de la théorie des catégories. Car la théorie des catégories est une théorie des opérations dans la mesure où elle est une théorie des morphismes³⁷⁵. L'algèbre, et à sa suite la théorie des catégories, se présentent ainsi pour les sciences mathématiques comme les *analogues* de la cybernétique pour les sciences objectives empiriques. Car ce sont des méthodologies et des techniques inter-scientifiques, ainsi que des sciences des opérations.

³⁷³ G. Simondon, « Cybernétique et philosophie » (1953), in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, *op. cit.*, p. 42.

³⁷⁴ B. Timmermans, *Histoire philosophique de l'algèbre moderne*, *op. cit.*

³⁷⁵ B. Mèlès, « Pratique mathématique et lectures de Hegel, de Jean Cavailles à William Lawvere », art. cit., p. 158 : « Un morphisme est ce qui, à un objet, en associe un autre ; on peut le concevoir comme un processus de transformation. Tel est par exemple le morphisme “hachoir” qui transforme la vache en steak haché. »

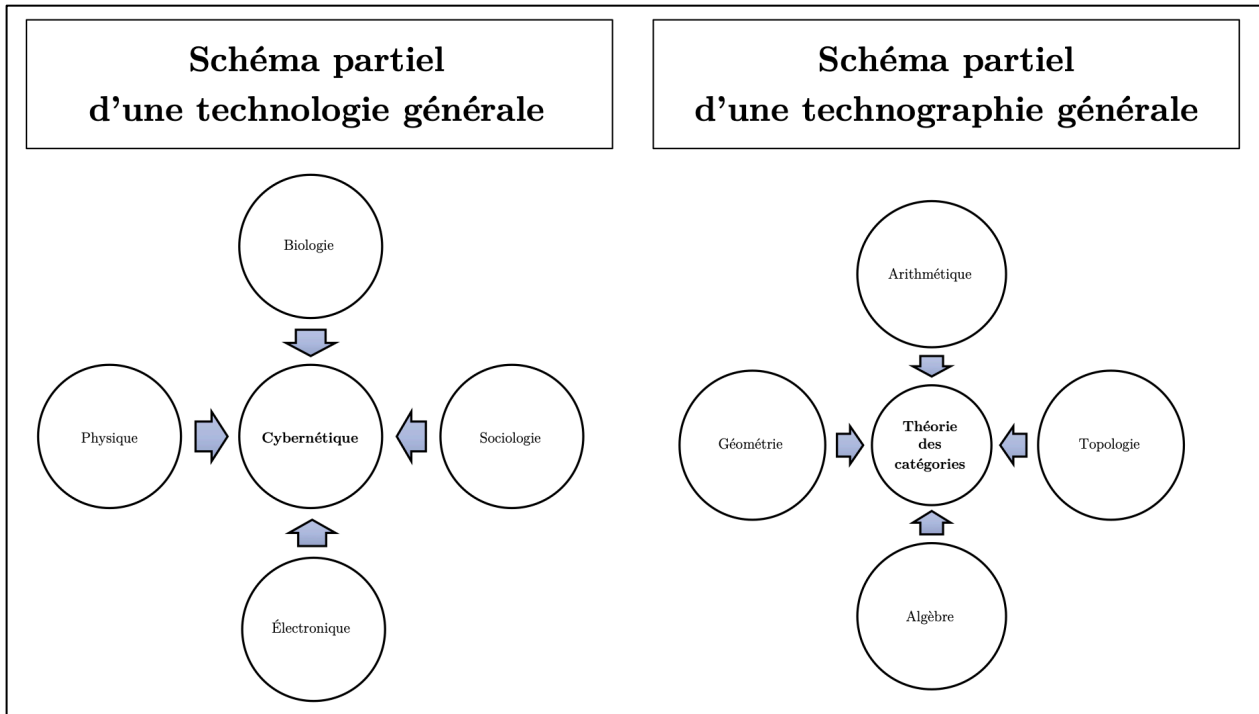


Figure 138 : Schéma simplifié d'une théorie générale des opérations équivalentes

L'analogie devient le principe méthodologique d'une technologie matérielle lorsqu'elle considère ses objets comme des *systemes*, susceptibles d'une double comparaison : structurale et opératoire. Dans le premier cas les objets sont appréhendés comme des touts structurés suivant une systématique analytique (comparaison structurale) ; dans le second cas ils sont appréhendés comme des touts structurés suivant l'organisation temporelle de leurs fonctions pour l'obtention d'un même résultat (comparaison opératoire). L'analogie est en effet dite *structurale* si elle parvient à dégager un invariant analytique, caractéristique de ce qu'ils *sont* ; elle est dite *opératoire* si elle parvient à dégager un invariant fonctionnel, un mode opératoire ou schème de fonctionnement, caractéristique de ce qu'ils *font*, c'est-à-dire du devenir de leur être, qui est un dynamisme transformateur. On peut donner comme exemple d'analogie opératoire l'équivalence fonctionnelle entre une machine à calculer employant un système de numération binaire et un homme accomplissant consciemment un calcul avec un système de numération décimal. Dès lors on s'aperçoit que « la machine n'est pas un être

artificiel imitant structurellement l'homme, mais bien un *dispositif capable de remplacer l'homme en remplissant une fonction déterminée : équivalence des fonctions constituées par des opérations différentes*³⁷⁶ ».

Deux objets possédant des analogies structurales complètes dans leur systématique analytique et des analogies opératoires complètes dans leur schématisme temporel d'évolution peuvent alors être qualifiés d'identiques : ils appartiennent à une même classe d'équivalence ontologique d'objets scientifiques ou techniques. Le dégagement d'analogies structurales est le travail de la science déterministe et analytique : il implique l'adoption du postulat épistémologique commun au criticisme et au positivisme, qui est au fondement de ce que Simondon nomme « l'axiomatique de l'objectivisme phénoméniste³⁷⁷ ».

1.3 Les postulats de l'objectivisme phénoméniste

Ces postulats sont les suivants : les opérations initiales et finales qui président au processus d'investigation de la science et l'achèvent ne font pas partie de la connaissance objective. Les opérations initiales sont les hypothèses formulées sous forme d'enchaînements d'opérations formelles ; les opérations finales sont les opérations de comparaison conduisant à la découverte d'analogies entre formules. L'objectivisme phénoméniste reconnaît donc deux catégories d'opérations subjectives comme étant au principe de l'objectivité sans pourtant être reconnues comme pouvant être objectivables : l'invention des hypothèses et l'intuition des rapports analogiques.

La normativité de la science moderne tient en ce que mathématiques et épistémologie, dans le criticisme comme dans le positivisme, sont postulées comme étant constitutives de deux connaissances opératoires valables : la connaissance mathématique et la connaissance

³⁷⁶ G. Simondon, « Épistémologie de la cybernétique », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, *op. cit.*, p. 186.

³⁷⁷ *Ibid.*, p. 180.

épistémologique. La première consiste en la connaissance d'objets virtuels, c'est-à-dire réels sans être actuels, médiatisée par la maîtrise d'une technique intellectuelle. Cette technique consiste en la manipulation d'un langage symbolique qui présuppose des inventions graphiques permanentes, constitutives des outils, instruments et machines formelles de la science mathématique. C'est pourquoi les mathématiques forment la technologie intellectuelle de la pratique scientifique des partisans de l'objectivisme phénoméniste.

Dans ce paradigme, la fonction des mathématiques est d'élaborer des techniques de mesure et de transformations des mesures. La fonction de l'épistémologie est quant à elle de construire les concepts réflexifs qui permettent de penser les résultats de la science, c'est-à-dire de leur donner du sens, et d'opérer les rapprochements analogiques permettant la simplification et l'unification des théories, ainsi que la redistribution des nomenclatures. Les résultats de la science sont donc fournis par les sciences structurales (et non par les sciences opératoires) au terme des pratiques qui mettent en œuvre le travail nécessaire à la vérification des hypothèses (opérations privilégiées des sujets scientifiques, les savants). Ces pratiques consistent essentiellement en des calculs de corrélations et d'approximations entre ce qui est déduit et mesuré formellement et ce qui est prédit et mesuré expérimentalement. Les techno-phénomènes symboliques doivent concorder avec les techno-phénomènes expérimentaux. Les premiers, pour faire sens, devant quant eux être matériellement inscrits dans des théories supportées par la technique de l'écriture.

Les hypothèses forment donc des enchaînements d'opérations formelles, parce que ce qui prévaut normativement, ce sont les mathématiques. Les hypothèses de l'objectivisme phénoméniste sont donc des formules opératoires qui ont pour visées d'expliquer des structures objectives. Le problème épistémologique concernant le statut des hypothèses est donc le suivant : comment un enchaînement d'opérations formelles peut-il se traduire en structures non formelles, en structures objectives ? Par quelles médiations des opérations

subjectives (hypothèses) peuvent-elles être converties en structures objectivement, c'est-à-dire prouver qu'elles ne sont pas des opérations arbitraires ?

Trois processus de conversion doivent s'enchaîner : 1° la conversion des opérations subjectives en *structures théorématiques* graphiquement objectivées dans un symbolisme formel ; 2° la conversion des résultats démontrés (théorèmes) en *instruments de mesure concrétisés* ; 3° la reconversion des mesures produites par les instruments concrets en *structures formelles démontrées*. Ce processus a valeur de preuve expérimentale si la reproduction de l'hypothèse comme condition d'expérimentation conduit à la reproduction de la mesure expérimentale comme prédiction concordant avec la mesure formelle entendue comme *conséquence déductive de la théorie* ou *résultat d'un calcul théorique*. Au terme de ce processus, la mesure réalise alors sa fonction de médiation entre théorie et expérience.

Dans ce paradigme, le phénomène est donc réduit à la mesure, l'objet à un faisceau de mesures, la théorie à un enchaînement de formules opératoires concrétisées en structures matérielles de captations métrologiques³⁷⁸. Le sujet scientifique correspond quant à lui à un individu opérant mystérieusement à coups de formulations d'hypothèses et d'intuitions analogiques. Si un phénomène scientifique consiste en une mesure, en quoi consiste un objet scientifique ?

Dans l'objectivisme phénoméniste, qui est le paradigme épistémologique de la pensée scientifique depuis Kant, chaque science se définit par son objet : il y a donc un primat de l'objet sur la méthode. La science est la théorie du réel, et ce réel est un immense territoire découpé en domaines. Chaque domaine est celui d'une science spécialisée définie par son objet. Dans ce cadre, un objet scientifique est un faisceau de mesures dont la structure est unifiée par une théorie, c'est-à-dire par un système de concepts organisés en hypothèses dont

³⁷⁸ D'où le sens de la formule de Bachelard selon laquelle « les instruments ne sont que des théories matérialisées » (G. Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique* (1934), 7^e éd., 4^e tirage Paris, Presses universitaires de France, p. 16).

les conséquences déductives doivent avoir pour corrélats dans l'expérience des phénomènes prédictibles. Si les mesures expérimentales issues des protocoles de vérification concordent avec les résultats des calculs théoriques établis *a priori*, alors l'hypothèse est vérifiée et l'objet, avéré.

Dès lors on peut définir l'objet scientifique non formel (*i.e.* non logique et non mathématique) comme celui auquel on a retiré le caractère crucial qui pourrait en faire un sujet : la spontanéité opératoire. Le phénomène scientifique est donc le terme inerte d'une relation réduite à une loi. C'est une mesure telle qu'elle est reliée à une autre mesure par une relation nommée loi et telle que cette relation peut être formalisée mathématiquement. Cette formalisation suppose l'invention d'un symbolisme graphique dont les formules, construites à partir d'une liste finie d'éléments discrets nommés symboles, permettent d'exprimer la loi, soit sous forme de fonction, soit sous forme d'équation, soit sous forme d'algorithme. Fonction, équation et algorithme se présentent alors comme les trois grandes classes de formules de la science formelle symbolique : la logique mathématique.

Le dégagement d'analogies opératoires est quant à lui le travail de la théorie de l'information, qui est foncièrement duale, puisqu'elle est à la fois une science structurale et une technique opératoire, dans la mesure où elle étudie les conversions de structures en opérations, et réciproquement. Grâce à elle, les techniques peuvent se structurer sous formes de sciences, et les sciences, s'opérationnaliser sous formes de techniques³⁷⁹. Le dégagement de telles analogies implique l'adoption des postulats de ce qu'il faut dès lors nommer l'*objectivisme opératoire*, qui est l'impensé des sciences structurales et le complément de l'objectivisme phénoméniste.

En effet alors que la *science structurale* suppose un sujet connaissant qui invente des opérations (comme la formule mathématique de la gravitation par Newton) pour expliquer

³⁷⁹ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 154-155.

des changements de structures (comme la chute rectiligne d'un corps soumis à la pesanteur terrestre ou le mouvement orbital de la Lune autour de la Terre), la *science opératoire* suppose un sujet connaissant qui invente des structures pour expliquer les transformations entre structures, c'est-à-dire les opérations objectives qui président à ces transformations. C'est pourquoi « la théorie de l'information n'a donc pas directement pour but d'étudier l'information, mais les opérations particulières qui transforment une information en une autre espèce d'information : codage, chiffage, déchiffage, modulation, démodulation³⁸⁰ ».

2. Ressemblance et analogie

2.1 La genèse de la ressemblance comme principe de méconnaissance

La structure formelle de l'analogie, qu'elle soit structurale ou opératoire, ontologique ou génétique, s'oppose à l'opération matérielle de la ressemblance, qui est un rapport d'identité posé entre les objets rapprochés et étudiés au terme d'une transformation assimilatrice opérée par le sujet connaissant. Les raisons qui président à la production de la ressemblance sont ainsi l'aveuglement d'un sujet apprenant, la négation ou la dénégation d'un sujet enseignant, face aux différences réelles enveloppées dans les objets pris comme supports de la connaissance. Ces raisons principales sont donc d'ordre judiciaire : la ressemblance produit une identification illusoire par ignorance, occultation ou effacement des différences perceptibles entre les objets étudiés, qu'elles soient structurales ou opératoires. Distillée par des procédés rhétoriques, elle peut d'ailleurs se figer en cliché fermement conservé dans des formules toutes faites, porteuses de méconnaissances : de telles formules sont en effet les terreaux des croyances dogmatiques et des idéologies. Exprimée par une métaphore vive dans un discours manipulateur, la ressemblance peut se dégrader en

³⁸⁰ G. Simondon, « Épistémologie de la cybernétique », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, op. cit., p. 181.

catachrèse vide sous forme de proposition dogmatique. En revanche, l'analogie, qui n'est ni sophistique, ni démagogique, mais essentiellement zététique, est ce qui doit donner lieu à des inférences productrices d'un supplément d'intelligibilité, comme nous l'avons montré avec l'exemple de l'algèbre géométrique cartésienne.

En ce sens, la ressemblance est foncièrement *rhétorique*, au sens où elle conduit à la production des formules de la méconnaissance telles qu'elles sont manipulatrices des affects (les *pathêmata*) ; tandis que l'analogie est foncièrement *mathématique*, au sens où elle conduit à la production des formules de la connaissance telles qu'elles sont donatrices des concepts, c'est-à-dire des véritables contenus de la connaissance (les *mathêmata*). La ressemblance est donc expressive de la grossièreté et de la confusion et mène à une connaissance réductrice et illusoire ; tandis que l'analogie est expressive de la précision et de la distinction et conduit à l'obtention d'une connaissance supplémentaire, donc à l'extension de la connaissance, sous forme de connaissance structurale ou de connaissance opératoire.

Dans sa simplicité la plus irréductible, l'analogie comporte donc du point de vue formel pur : des termes³⁸¹ (au moins quatre), des rapports (au moins deux), un postulat d'équivalence des rapports (devant permettre d'opérer une différenciation logique des contenus renvoyant à des différences réelles, structurales ou opératoires), enfin une inconnue, dont la découverte doit conduire à une extension de la connaissance. Elle se présente ainsi comme le prototype du raisonnement et de la méthode scientifiques tels qu'ils peuvent être réduits à leurs formes les plus simples. Par conséquent, l'analogie se présente en première analyse comme un instrument de découverte de l'inconnu (dans une structure partiellement connue) à partir d'une structure connue : elle est donc fondamentalement liée à une attitude

³⁸¹ Ces termes peuvent eux-mêmes être des objets, des situations d'interaction, des relations, des structures (si on augmente le degré de complexité du raisonnement analogique) voire des catégories au sens mathématique du terme (si on généralise maximale la fonction *terme* comme élément à partir duquel on peut *initier* la construction d'un raisonnement analogique).

de recherche et d'apprentissage. L'accès à cet inconnu définit alors une méthode de découverte : les résultats de la recherche deviennent les nouveaux contenus d'un apprentissage. L'accès à ces contenus définit une méthode d'enseignement : la méthode d'enseignement est ce qui conduit aux résultats de la recherche et à leur transmission.

L'analogie, entendue ainsi comme principe heuristique, implique une activité de comparaison, donc un sujet connaissant *actif*. Elle donne d'emblée un critère de distinction entre le spontané et le réfléchi du point de vue d'une physique des opérations de l'esprit : à l'association *spontanée* de la fantaisie, elle oppose une comparaison *réfléchie* de l'intelligence qui opère la recherche des différences réelles et des identités de rapports entre les choses (les différences de nature et les modes opératoires purs). Elle ne doit donc pas être confondue avec une simple association d'idées par ressemblance, qui peut d'ailleurs être provoquée de trois manières différentes, ce qui permet d'explicitier les raisons principielles énoncées ci-dessus.

2.2 Les causes productrices de la ressemblance

La ressemblance peut être produite dans le sujet connaissant à cause de l'équivalence intensive des charges émotives enveloppées dans les impressions qui l'affectent. La ressemblance est alors tissée par la force des affects impliquée dans les impressions vécues du sujet pathologique, comme l'a montré Hume dans le livre II du *Traité de la nature humaine*, et comme l'a magistralement analysé Frédéric Brahami dans son commentaire systématique³⁸². Par modulation diagrammatique au sein d'un dispositif de création picturale, comme en témoignent certaines toiles de Francis Bacon (telle *Painting* de 1946),

³⁸² F. Brahami, *Introduction au Traité de la nature humaine de David Hume, op. cit.*, p. 55-58 : « On comprend alors la grande malléabilité et l'absence de rigueur de l'imagination dans la saisie des ressemblances : une autre disposition d'esprit, et c'est le violet qui ressemble plus au bleu qu'au rouge ; un grand besoin d'eau plutôt qu'une disposition à la méditation, et la vue de l'océan fera passer l'imagination à la source fraîche plutôt qu'au ciel étoilé, qu'on voit aussi bien dans le désert aride. »

la déformation de complexes de percepts peut conduire à l'analogie esthétique³⁸³, identité de rapports figuraux produite avec des moyens non ressemblants. Dès lors, l'analogie esthétique se présente « comme une règle de trois qui s'exécute dans l'instrument sensible³⁸⁴ », en produisant les quatrièmes proportionnelles du sensible. De l'association par ressemblance à l'analogie esthétique en passant par la métaphore rhétorique, on pourrait alors décrire la genèse de la similitude de sa spontanéité psychologique à sa production esthétique réfléchie. Cette genèse s'apparente à un véritable processus de concrétisation, puisque l'analogie esthétique peut être produite, comme nous le montre le programme de Bacon, par un dispositif de création artistique dans le *hic et nunc* de la modulation diagrammatique : l'oiseau déformé en percept pictural homme-parapluie-viande, son analogue esthétique figural non ressemblant, dans *Painting*³⁸⁵. L'analogie esthétique est donc la concrétisation de la ressemblance produite au terme d'une « logique de la sensation », puisqu'elle produit comme l'écrit Deleuze « la ressemblance avec des moyens non ressemblants », c'est-à-dire la sensation d'une *identité de rapports* entre contenus esthétiques sans *rapports d'identité*.

D'une autre manière, la ressemblance peut être produite à cause d'une homonymie de termes renvoyant à des objets dont les finalités pratiques masquent leurs différences fonctionnelles réelles. Dans ce cas, la conséquence de la ressemblance est qu'elle induit une connaissance illusoire, car purement nominale. En effet, en vertu du principe d'équivalence des méthodes ou principe d'équivalence fonctionnelle énoncé plus haut, un même résultat peut être obtenu à partir d'opérations et de structures très différentes. Par exemple, une

³⁸³ G. Deleuze, *Francis Bacon : logique de la sensation* (1981), tome 1, 4^e éd., Paris, les éditions de la Différence, p. 100.

³⁸⁴ D. Diderot, « Suite de l'entretien entre D'Alembert et Diderot », in H. Dieckmann, J. Fabre, J. Proust, et al. (dir.), *Œuvres complètes*, tome XVII, Paris, Hermann, 1987, p. 110. Cité par A. B. Maurseth, « La règle de trois : l'analogie dans *Le Rêve de D'Alembert* », *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, 34 | avril 2003, document 9, n. 1.

³⁸⁵ On trouve la reproduction de cette toile dans : G. Deleuze, *Francis Bacon : logique de la sensation* (1981), tome 2, 4^e éd., Paris, les éditions de la Différence, Figure 30.

sonnette électrique (Figure 139) est équivalente à une horloge électrique (Figure 140), car elle fonctionne grâce au principe d'établissement et de rupture d'un courant dans un circuit à partir d'une action par contact. Le rapport $\frac{\text{Opérateur humain}}{\text{Sonnette}}$ est strictement équivalent au rapport $\frac{\text{Balancier}}{\text{Horloge}}$. Il y a donc beaucoup plus d'analogie réelle entre une horloge électrique et une sonnette électrique, qu'entre cette horloge électrique et une horloge à poids, dont l'ensemble *poids - roue motrice - remontoir - tambour* (Figure 141) est strictement équivalent à un treuil de carrière (Figure 142).

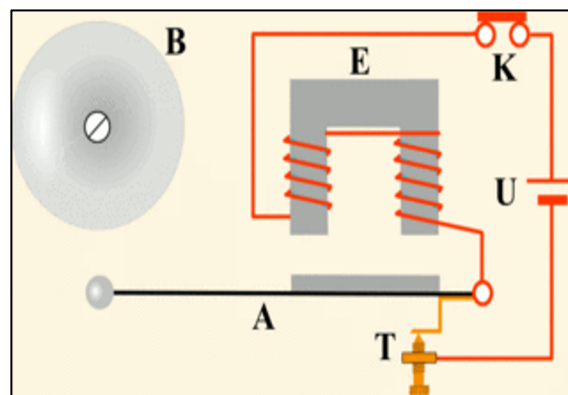


Figure 139 : Schéma d'une sonnette électrique³⁸⁶

³⁸⁶ https://www.editions-petiteelisabeth.fr/matiere_et_energie_2.php

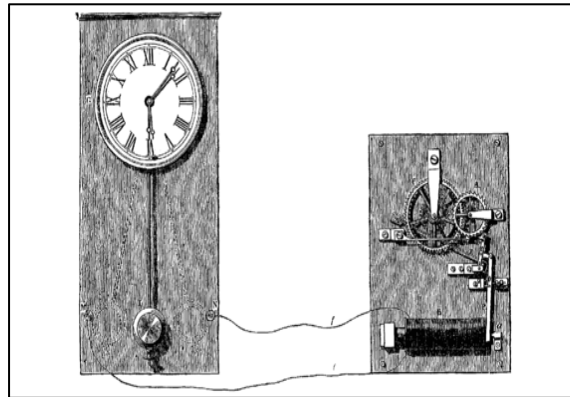


Figure 140 : Horloge électrique³⁸⁷

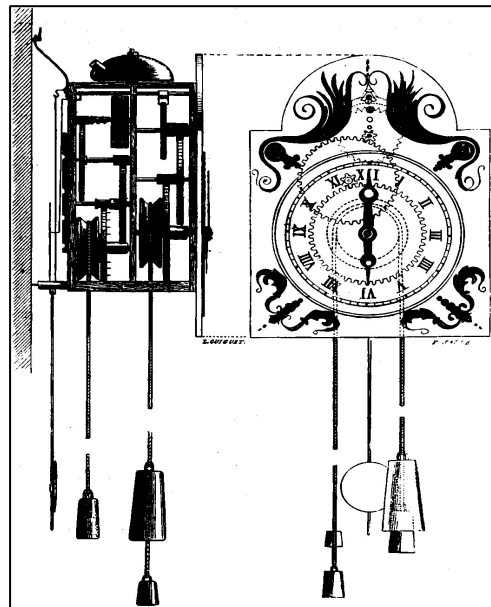


Figure 141 : Horloge à poids³⁸⁸

³⁸⁷https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Merveilles_de_la_science/Les_Horloges_%C3%A9lectriques#/media/Fichier:T2-_d411_-

[_Fig._245._%E2%80%94_Horloge_r%C3%A9gulatrice_et_cadran_%C3%A9lectrique.png](#)

³⁸⁸https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/ARAGO_Francois_Astronomie_Populaire_T1_page_0074_Fig20.jpg

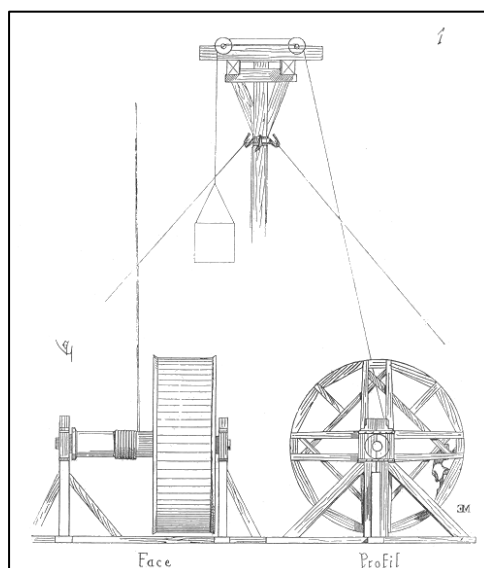


Figure 142 : Treuil à roue³⁸⁹

³⁸⁹ <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Treuil.a.roue.png>

Enfin la ressemblance peut être produite à cause de la reconnaissance partielle d'un caractère commun entre deux objets dont les structures sont en réalité différentes. Dans ce cas, la conséquence de la ressemblance est la production d'une métaphore trompeuse, puisque l'analogie partielle implique l'oubli des différences réelles. La métaphore peut donc être définie comme une analogie partielle conduisant à une assimilation abusive ; tandis que l'analogie véritable conduit à une différenciation réelle autorisant une différenciation logique, c'est-à-dire une invention conceptuelle saisissant les articulations du réel, les différences de nature.

2.3 De la sériation des ressemblances à la structuration de l'analogie

La série des idées ressemblantes associées par la fantaisie (abstraction faite de la charge émotive que les impressions peuvent envelopper en elles), que Deleuze nomme « analogie vulgaire³⁹⁰ », est exactement celle que décrit Foucault dans le chapitre II des *Mots et les choses*³⁹¹. C'est probablement elle qui est mise en œuvre dans la géométrie et la mécanique pratiques de la mentalité technique primitive, saisissant des structures et des schèmes opératoires vagues à même le sensible.

Or, dès lors qu'elle est contrôlée par l'activité de comparaison de l'intelligence réfléchie, cette sériation peut être ordonnée, donnant ainsi naissance à la première forme d'analogie structurée, qui plonge ses racines dans la théologie chrétienne et la scolastique médiévale. Elle est nommée par saint Thomas d'Aquin « analogie de proportion³⁹² ». On peut aussi la nommer *analogie sérielle*. Sa formule générale est la suivante :

³⁹⁰ G. Deleuze, cours du 14 janvier 1974, Centre universitaire de Vincennes : « L'analogie vulgaire c'est la simple similitude de la perception ». <https://www.le-terrier.net/deleuze/anti-oedipe1000plateaux/1514-01-74.htm>

³⁹¹ M. Foucault, *Les mots et les choses*, Paris, Gallimard, 1966, chapitre 2, « Les quatre similitudes », p. 32-40.

³⁹² Comme l'écrit B. Landry dans son article « L'analogie de proportion chez saint Thomas d'Aquin », *Revue néo-scholastique de philosophie*, n° 95, 1922, p. 279 : « Un Dieu dont l'être est affirmé en toute vérité – *analogum princeps* – des créatures dont l'être est affirmé en raison du rapport qu'elles possèdent avec Dieu – *analogata principia* – telle est l'analogie qui est la loi universelle de l'être. Thomas d'Aquin appelle « analogie de proportion » ou « d'attribution » cette participation de l'être créé à l'être incréé. »

***a* ressemble à *b*, *b* ressemble à *c*, etc.**

Ce type d'analogie établit des ressemblances graduées entre une qualité éminente et ses différentes incarnations sensibles. Elle permet donc d'ordonner des ressemblances qui diffèrent le long d'une série. L'histoire naturelle procède par exemple par analogie de proportion. Elle induit l'édification des premiers systèmes de classification.

Lorsqu'elle s'étend aux corrélations de caractères, elle donne naissance à ce que Thomas d'Aquin nomme l'« analogie de proportionnalité », que nous nommions précédemment *analogie structurale*, et qui définit l'acte de naissance de la science structurale. Sa formule générale est :

a* est à *b* ce que *c* est à *d

Comme l'écrit Bernard Landry : « Être pilote ou être roi sont des choses complètement différentes, et cependant elles sont analogues, parce que le pilote est à son navire ce qu'est le roi à son royaume³⁹³ ». Ou comme l'écrivent encore Deleuze et Guattari : « *Les branchies sont à la respiration dans l'eau ce que les poumons sont à la respiration dans l'air ; ou bien le cœur est aux branchies ce que l'absence de cœur est aux trachées*³⁹⁴ ».

Dès lors, lorsque les caractères ne renvoient plus à des contenus phénoménologiques mais à des contenus scientifiques, c'est-à-dire à des mesures, l'analogie de proportionnalité devient loi. Le caractère ou l'objet est alors réduit à une mesure. La loi est ce qui détermine l'objet mesuré à correspondre à telle mesure : elle est l'expression d'un rapport de proportionnalité entre deux mesures. La loi explique donc le rapport d'interdépendance de deux caractères objectifs ou de deux objets scientifiques dans leur

³⁹³ B. Landry, « L'analogie de proportionnalité chez saint Thomas d'Aquin », *Revue néo-scholastique de philosophie*, n° 96, 1922, p. 454.

³⁹⁴ G. Deleuze & F. Guattari, *Mille Plateaux*, Paris, Minuit, 1980, p. 286.

variation métrologique. Elle rend possible le développement d'une physique mathématisée.

2.4 Analyse des critères de la ressemblance et de l'analogie

On peut donc maintenant dégager trois critères de la ressemblance, qui en caractérisent la négativité épistémologique selon nous : son moteur émotif, son verbalisme illusoire, son abstraction partielle. La ressemblance est le négatif d'une pensée analogique bien comprise dans sa distinction d'avec la métaphore. L'analogie n'est pas une opération de la « folle du logis » (Pascal), mais bien une opération de l'intelligence sous-tendue par une observation minutieuse et soutenue par une attention énergique dans l'activité de comparaison. L'analogie, pour être un véritable opérateur épistémologique, présuppose donc observation et implique attention. Elle ne désigne ainsi ni un procédé rhétorique de manipulation, ni un procédé pédagogique d'enseignement, ni un prestige esthétique de l'imagination poétique ou artistique, mais un procédé d'invention, qui s'origine dans l'intuition, se poursuit en heuristique laborieuse et peut se systématiser en méthode lorsque la réflexivité d'une intelligence résolue qui a vaincu une difficulté se dépasse pour rendre compte de la perfection de sa démarche : ce qui lui permet de convaincre, dans le mesure où le suivi de la méthode conduit à la certitude du résultat. On atteint la victoire en *démontrant*, non en *convainquant* : et on convainc victorieusement en démontrant.

On oppose les trois critères suivants, qui caractérisent selon nous la positivité épistémologique de l'analogie bien comprise :

- la modulation paradigmatique réfléchie, autorisant la traduction logique de structures et de dynamismes ontologiques ;
- l'équivalence démontrée, autorisant le dégagement d'un principe d'induction analytique et d'un principe d'induction analogique³⁹⁵ ;

³⁹⁵ Simondon nomme ces deux types respectivement « induction déterministe » et « induction cybernétique », la première désignant l'induction mise en œuvre par les sciences structurales ; la seconde, l'induction mise en œuvre par les sciences opératoires : « Le devoir de l'épistémologie est de distinguer ces

- l'abstraction totalisante comme connaissance complète des structures essentielles et des schèmes opératoires réels des objets étudiés, alors réduits à leur représentation symbolique la plus irréductible. Elle est composée de structures figurales et de diagrammes opératoires autorisant la réappropriation encyclopédique et l'invention.

On peut dès lors nommer *anamnèse analogique* l'activité herméneutique conduisant à l'actualisation des schèmes opératoires inscrits dans des supports de savoir sous forme d'une réinvention. Elle définit le principe de ce que nous nommons une *herméneutique opératoire*. C'est par un tel acte analogique que Shannon a traduit concrètement les fonctions logiques de l'algèbre booléenne en portes logiques dans les circuits électroniques. Ce qui en fait, avec Turing, l'un des pères de notre modernité technologique : celle de l'électronique numérique, régie par le principe technique du calcul automatique, lui-même fondé sur l'universalité de la machine de Turing.

La fonction épistémologique de l'analogie est donc d'effectuer une comparaison pour chasser la *ressemblance* superficielle spontanément commandée par le transport métaphorique d'une imagination passive soumise à la domination des affects, au profit d'une *équivalence* plus profonde, démontrée et vérifiée : l'équivalence opératoire de deux dynamismes transformateurs ou l'équivalence fonctionnelle de deux mécanismes techniques. Car l'analogie est elle-même une « équivalence transopératoire³⁹⁶ », c'est-à-dire l'acte de vérification d'une identité de rapports opératoires (et non structuraux) par la médiation des opérations de la pensée. Cette vérification est fondée sur le fait que la genèse des opérations de la pensée reproduit le schématisme opératoire de l'objet connu et vérifie l'identité de rapports opératoires du fonctionnement de l'objet connu au

deux types de science, afin qu'à aucun moment une induction cybernétique ne puisse être confondue avec une induction déterministe. L'induction cybernétique ne suppose pas l'identité de structure des êtres qu'elle réunit, mais seulement l'équivalence fonctionnelle de leurs opérations. » (« Épistémologie de la cybernétique », in I. Saurin & N. Simondon (dir.), *Sur la philosophie, op. cit.*, p. 191).

³⁹⁶ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information, op. cit.*, p. 531. Cet acte analogique, tel que le décrit ontologiquement Simondon, a d'ailleurs été thématiqué par la théorie des catégories, formalisé puis désigné par la notion de foncteur.

fonctionnement de l'objet de recherche. La formule générale d'une telle équivalence est la suivante :

$$\text{Si } \frac{A}{B} = \frac{A'}{B'} \text{ et que } \frac{A'}{B'} = \frac{C}{D} \text{ alors } \frac{A}{B} = \frac{C}{D}$$

La généralisation de cette procédure est à l'origine de la pensée rationnelle, parce qu'elle permet de rationaliser le devenir sans présupposer que les structures de la pensée rationnelle sont les décalques de structures figées et éternelles. La recherche des analogies opératoires, comme méthode heuristique, ne suppose donc pas l'identité du rationnel et du réel, même si elle cherche à rationaliser le devenir.

3. L'analogie comme méthode d'universalité

La méthode analogique s'ancre donc dans l'analyse d'objets ou de situations qu'elle définit comme *paradigmatiques* au sens où ces objets et ces situations constituent des terrains pré-réflexifs pour la conscience réfléchissante qui cherche à connaître le réel qu'elle affronte au sein du milieu de vie dans lequel elle est jetée et dont elle réfléchit la spontanéité irréductible, celle d'un réel qui l'excède et qu'elle cherche à s'approprier, pour le comprendre et l'expliquer. En ce sens :

Une philosophie peut ce que peuvent ses paradigmes, sa relation primitive et analytique à l'être. (...) En ce sens peut-être et selon cette limitation on pourrait parler d'une nature de chaque philosophie, comme il y a une nature de la graine qui pourra se développer en arbre et en forêt : pouvoir d'expansion, mais d'expansion selon certaines directions qui à la rencontre des structures de l'être deviendront des chemins définis et peut-être bornés³⁹⁷.

Ainsi, au concept phénoménologique de variation eidétique, nous substituons ce que nous avons nommé la *modulation paradigmatique*. La première vise une essence

³⁹⁷ G. Simondon, « Recherche sur la philosophie de la nature (autour de 1955) », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie, op. cit.*, p. 31.

structurale que l'on cherche à dégager ; la seconde, à intégrer un élément fonctionnel et opératoire. La modulation paradigmatique est un *appareillement* : elle est découverte d'une source vive, d'un milieu associé, fonctionnellement annexé à un appareil psychique.

Cela nous conduit à considérer l'analogie valide comme une méthode d'universalité. Le penseur le plus illustre ayant fait usage de cette méthode est Simondon : il l'a même systématisée, en radicalisant d'ailleurs la méthode intuitive de Bergson grâce à la théorie de l'information ; subvertissant ainsi la dialectique hégélienne, à partir de la thermodynamique des états loin de l'équilibre et des conséquences morphogénétiques qui en dérivent, dans une théorie positive, cumulative et indéfiniment extensible de la résolution des problèmes.

Qu'elle l'ait fait volontairement ou non, en connaissance de cause ou pas, la philosophie simondonienne s'est mise sous conditions d'événements scientifiques qui ont marqué l'immédiat après-guerre : la cybernétique, la théorie des catégories, mais aussi la biologie moléculaire. À notre connaissance, Simondon ne connaissait pas la théorie des catégories, mais il devait peut-être en avoir eu des échos, car il suivait le séminaire de René Thom, nommé professeur permanent à l'IHES en 1963, où se trouvait déjà en poste Grothendieck depuis 1958. Grothendieck, en introduisant les notions de schéma et de topos, était en train d'initier une révolution dans la géométrie algébrique abstraite mais plus généralement dans les mathématiques du 20^e siècle. Que ce soit en cybernétique, en géométrie algébrique ou dans la théorie des catastrophes, l'analogie était au cœur de la production de savoirs nouveaux produits par des mathématiciens. L'un d'entre eux, George Polyá, affirmait d'ailleurs la chose suivante : un mathématicien de talent voit des analogies, tandis qu'un mathématicien de génie voit des analogies entre des analogies³⁹⁸.

C'est aux questions que nous avons posées en introduction de ce chapitre que cherchent à répondre l'élaboration de la pensée simondonienne, dont la méthode se fonde

³⁹⁸ F. Varenne, « Théorie mathématique des catégories en biologie et notion d'équivalence naturelle chez Robert Rosen », art. cit., n. 44.

sur un postulat, qu'on peut nommer « postulat de relationnalité ». Ce postulat, il faut le rapprocher de ce que dit Deleuze à propos de ce qui soutient tout exercice de la pensée selon lui.

3.1 Postulat de relationnalité, image de la pensée, méthode et pratique philosophique

Deleuze soutient en effet que tout exercice de la pensée présuppose une certaine image que la pensée se fait d'elle-même³⁹⁹. Cette image de la pensée varie d'une philosophie à une autre. Mais ce n'est pas parce que cette image varie au cours de l'histoire que les philosophies sont arbitraires, bien au contraire. Avec Socrate, la pensée se vit comme accouchement, avec Descartes, elle se vit comme mécanisme, avec Hume, elle se vit comme enquête, avec Kant, elle se vit comme activité juridique dans le tribunal de la raison, etc. On pourrait multiplier les exemples. Ce que nous voudrions montrer à partir de cette thèse de Deleuze sur l'histoire de la pensée, en tant qu'elle n'est pas réductible à la simple histoire de la philosophie, ni réductible à un ensemble de facteurs socio-historiques, c'est que l'image de la pensée est le paradigme, historiquement situé, à partir duquel une pratique philosophique se systématisait progressivement en méthode. Dans cette mesure, la philosophie peut se définir comme *méthodologie de la pensée historiquement située et paradigmatiquement ancrée* : il y a une méthode de Socrate, il y a aussi une méthode de Platon, une méthode d'Aristote, une méthode de Descartes, une méthode de Kant, une méthode de Bergson, etc. Mais la méthode ne nous dit pas selon Deleuze quelle image la pensée se fait d'elle-même. Pourquoi ?

Parce que la méthode présuppose une image de la pensée, image variable d'une philosophie à une autre. Cette image de la pensée, c'est la face cachée de la raison discursive dont la méthode est le voile, sinon le masque qui la recouvre. Elle présuppose un espace-temps de la pensée que Deleuze nomme à la suite de Bakhtine « chronotope⁴⁰⁰ », qui est marqué et signalé par des cris philosophiques qui sont l'expression des limites de la pensée et du pensable⁴⁰¹.

³⁹⁹ G. Deleuze, *Différence et répétition*, Paris, Presses universitaires de France, 1969, ch. 3.

⁴⁰⁰ M. Bakhtine, *Esthétique et théorie du roman*, Paris, Gallimard, 1978, p. 235.

⁴⁰¹ G. Deleuze, cours du 30 octobre 1984 à Vincennes. <https://www.webdeleuze.com/textes/356>

Ce que nous souhaitons montrer à partir de cette thèse de Deleuze, c'est que Simondon est l'introducteur d'une nouvelle méthode en philosophie, la méthode transductive, qu'on peut considérer à certains égards comme une radicalisation de la méthode bergsonienne, dans la mesure où l'intuition philosophique telle que la conçoit Simondon correspond à l'*analogie réelle* entre le devenir du sujet connaissant et le devenir des objets connus qu'il met en relation les uns avec les autres et avec lui-même, dans une hyperactivité réflexive. L'intuition comme transduction désigne chez Simondon la saisie de l'analogie opératoire entre au moins deux relations objectives ou situations objectives d'interaction : elle est l'*opération analogique* vécue par le sujet connaissant. Elle est donc une analogie entre au moins trois opérations : deux opérations objectives et une opération subjective.

Ce qui justifie le rapprochement de la métaphysique simondonienne du devenir (qu'il baptise du nom d'« ontogénèse ») du système axiomatique de la théorie mathématique des catégories selon nous, c'est l'adoption d'un postulat commun. La théorie générale des processus d'individuation, que Simondon nomme aussi « allagmatique », est une théorie générale des opérations dans l'être ; la théorie des catégories, qui est une théorie générale des morphismes, est elle-même une théorie générale des opérations, mais des opérations formelles. L'unification de la théorie des opérations passera par une théorie achevée des opérateurs, car comme l'avait déjà compris Bachelard au moment de la révolution quantique, les opérateurs forment un plan de réalisation des lois mathématiques, en reliant les réalités mathématiques aux probabilités physiques⁴⁰², ce que confirment d'années en années depuis un siècle les résultats absolument contre-intuitifs de la mécanique quantique.

La question qui se pose est alors la suivante : s'il y a un primat de l'agir sur l'être, des opérations sur les structures, des morphismes sur les objets, comment une

⁴⁰² G. Bachelard, *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France, 1937, p. 99.

connaissance des opérations dans l'être est-elle possible ? Comment capturer ces opérations et les classer pour produire une science, une technique et une philosophie opératoires ?

Tout comme la cybernétique rend possible un « *encyclopédisme technologique*⁴⁰³ », la théorie des catégories rend possible un encyclopédisme de la connaissance mathématique. Simondon, lui, nous donne des outils conceptuels pour unifier ces encyclopédismes à travers un encyclopédisme philosophique foncièrement génétique⁴⁰⁴ qui permet d'unifier la connaissance concrète de la technologie cybernétique et la connaissance abstraite de la « *technographie*⁴⁰⁵ » mathématique, et renouer ainsi avec l'exigence originelle de la philosophie : penser les liens organiques entre les savoirs d'une époque suivant une exigence de totalisation.

Ce postulat commun à la cybernétique, à l'épistémologie simondonienne (dite « allagmatique ») et à la théorie des catégories, c'est celui qui consiste à donner une valeur épistémologique à la méthode analogique comme méthode de découverte, c'est-à-dire comme méthode de raisonnement valable et valide sous certaines conditions.

« Allagmatique » est un néologisme que Simondon forge pour redéfinir l'ontologie non plus comme théorie de l'être mais comme philosophie pratique et théorie de l'agir. Le terme provient du grec *allagma* (ἀλλαγμα) qui désigne le changement, mais qui peut vouloir dire aussi « la chose échangée ». C'est un terme qui dérive du grec *allasso* (ἀλλάσσω) qui veut dire « changer ». Chez Simondon, ce mot désigne « la théorie des opérations⁴⁰⁶ » par lesquelles se produisent des échanges de matière, d'énergie et d'information induisant des changements dans le devenir des individus physiques,

⁴⁰³ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 148.

⁴⁰⁴ J.-H. Barthélémy, *Simondon ou l'encyclopédisme génétique*, *op. cit.*

⁴⁰⁵ F. Sigaut, « Techniques, technologies, apprentissage et plaisir au travail », *Techniques & Culture*, n° 52-53, 2009, p. 42 : « Technographie est à technologie à peu près ce qu'ethnographie est à ethnologie. On peut regretter que ce mot ne soit pas entré dans l'usage courant. En revanche, cela a eu l'avantage de ne pas donner lieu aux mêmes confusions : technographie fait référence à la tâche qui consiste à décrire les techniques, et à rien d'autre. »

⁴⁰⁶ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 529.

biologiques, psychiques ou encore technologiques. On peut dire que c'est la théorie de ce qui dans l'opération d'échange, produit un changement dans l'interaction qu'un individu entretient avec son milieu.

Autrement dit, le postulat commun à l'allagmatique et à la théorie des catégories, c'est celui qui consiste à poser au commencement de la recherche qu'une connaissance de l'être est possible grâce aux dynamismes venant impacter les structures ontologiques par l'incidence d'opérations transformatrices. Dans la théorie des catégories comme dans l'allagmatique, le postulat de départ sur lequel repose toute l'enquête est l'idée selon laquelle, pour reprendre une expression de Jedrzejewski, « l'agir est consubstantiel à l'être⁴⁰⁷ ». Ce postulat une fois adopté devient valable, dans la mesure où il induit une extension effective de la connaissance, une productivité scientifique et épistémologique, comme en a par exemple témoigné la naissance de l'algèbre moderne avec Viète et Descartes, comme en témoignera au 19^e siècle le développement de la théorie des groupes, comme en témoigne aujourd'hui la fécondité de la théorie des catégories, qu'on peut voir à certains égards comme une lointaine descendante du formalisme algébrique leibnizien.

Or ce que Deleuze appelle « image de la pensée⁴⁰⁸ », Simondon, lui, le nomme « réflexion paradigmatique⁴⁰⁹ ». Alors que pour Deleuze l'image de la pensée est toujours implicite, les paradigmes chez Simondon sont toujours explicites : ils désignent les supports de la pensée, ses germes et ancrages matériels. Ils désignent l'ensemble des relations analytiques que la pensée entretient avec l'être entendu comme objet pourvu d'une actualité concrète susceptible d'être soumis à analyse réflexive : les paradigmes sont ce qui dirigent la pensée réflexive et la limitent, la contraignent à ne pas divaguer vers les chemins de la mauvaise métaphysique. C'est pourquoi Simondon écrit dans un manuscrit de recherche daté de 1955 qu'une philosophie « peut ce que peuvent ses

⁴⁰⁷ F. Jedrzejewski, *Ontologie des catégories*, *op. cit.*, p. 32.

⁴⁰⁸ G. Deleuze, *Différence et répétition*, *op. cit.*, ch. 3.

⁴⁰⁹ G. Simondon, « Introduction (Note sur l'attitude réflexive, autour de 1955) », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, *op. cit.*, p. 25.

paradigmes, sa relation primitive et analytique à l'être⁴¹⁰ ». Les paradigmes peuvent renvoyer à des objets techniques médiatisant la relation de l'homme au monde, comme en témoigne par exemple l'analyse de la turbine Guimbal dans la première partie de *Du mode d'existence des objets techniques*⁴¹¹. Ils peuvent aussi renvoyer à des théories scientifiques ou même encore à des expériences scientifiques, comme en témoigne toute la thèse principale de Simondon sur les différents régimes d'individuation.

La réflexion paradigmatique chez Simondon est donc inséparable de postulats. Or les postulats sont chez lui toujours explicites et ils sont en très petit nombre. On peut même affirmer qu'il n'y en a en réalité qu'un seul, reformulé de différentes manières dans les manuscrits préparatoires de la thèse principale⁴¹² ; ainsi que dans le recueil de textes inédits écrits entre 1950 et 1980⁴¹³. Ce postulat, c'est celui selon lequel « la relation a valeur d'être⁴¹⁴ », postulat éminemment catégoriste, que nous nommons « postulat de relationnalité ». Ce postulat ontologique n'est pas arbitraire, car il est solidaire d'une posture épistémologique qu'on trouve par exemple chez des savants et épistémologues comme Einstein et Bachelard, qu'on appelle le « réalisme des relations », sur lequel Barthélémy et Bontems ont écrit un article dans la *Revue de synthèse* en 2001⁴¹⁵.

⁴¹⁰ G. Simondon, « Recherche sur la philosophie de la nature (autour de 1955) », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, op. cit., p. 31.

⁴¹¹ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, op. cit., p. 66-68.

⁴¹² G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit.

⁴¹³ G. Simondon, in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, op. cit.

⁴¹⁴ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 143.

⁴¹⁵ J.-H. Barthélémy & V. Bontems, « Relativité et réalité : Nottale, Simondon et le réalisme des relations », art. cit.

3.2 Examen du postulat de réflexivité

En revanche, il y a un postulat implicite dans l'œuvre de Simondon. Or c'est lui qui engage toute la méthodologie de sa pensée. Barthélémy l'a mis en évidence dans son ouvrage de 2008⁴¹⁶. Ce postulat peut se formuler ainsi : *une pensée génétique du réel est possible parce que ce qui est objet de genèse peut être simultanément genèse de la pensée.* Est donc postulée une analogie réflexive entre la genèse de l'objet connu, pris comme paradigme, et la genèse du sujet connaissant, pris comme support de modulation. Ce qui veut dire la chose suivante : *le dynamisme d'un objet paradigmatique peut se transformer en paradigme méthodologique de la pensée dès lors que le schématisme opératoire au principe de sa genèse est partiellement transposable en un autre objet recherche par la médiation des opérations de la pensée.* On peut nommer ce postulat « postulat de réflexivité ». Dans les termes de Deleuze, ce postulat veut dire que « l'image de la pensée » peut se transformer en méthodologie de la pensée, c'est-à-dire en pensée philosophique ordonnée de façon non arbitraire dans sa genèse. La pensée génétique simondonienne, d'après ce postulat de réflexivité du réel, est donc une pensée qui ne sépare pas ses objets de sa méthode, et qui enrichit sa méthode à mesure que ses analyses génétiques progressent, puisqu'elle incorpore le schématisme opératoire des objets qu'elle étudie dans son dynamisme de recherche. Nous nous penchons maintenant sur les paradigmes dans lesquels s'enracine la pensée de Simondon.

Les paradigmes sont multiples chez Simondon. Il y a donc dans sa philosophie plusieurs « images de la pensée » au sens de Deleuze. C'est la combinaison de ces paradigmes, analytiquement décomposés, ingénieusement combinés et méthodologiquement transposés d'un domaine du réel à un autre, qui fait de sa pensée à la fois une orchestration de schèmes, une encyclopédie dynamique et un organisme en croissance. Cependant, on peut dire qu'il y a chez Simondon deux schèmes fondamentaux sur lesquels repose toute la méthodologie de sa pensée. Ces schèmes

⁴¹⁶ J.-H. Barthélémy, *Simondon ou l'encyclopédisme génétique*, op. cit.

opérateurs sont extraits de deux paradigmes scientifiques. Le premier est celui de la transduction. Il provient d'une discipline microbiologique, la bactériologie. Le second schème est celui des systèmes métastables. Il provient de la thermodynamique des états loin de l'équilibre. En couplant ces deux schèmes, on obtient le schème de l'« amplification transductive », premier moment d'un schématisme de la morphogenèse que nous analyserons plus loin⁴¹⁷. Ce qu'il s'agit d'explicitier pour le moment, c'est le statut du paradigme de la transduction dans la pensée de Simondon. Quel est-il ?

Il est d'abord méthodologique. La transduction est le paradigme méthodologique de l'ontogenèse psychique. Dans la mesure où Simondon adopte un postulat de réflexivité, la transduction logique s'opérant dans le cadre du développement psychique de l'individu pensant peut être congruente à l'ontogenèse des objets pensés, en vertu d'une relation analogique valide entre le schématisme opératoire des êtres connus et le schématisme des opérations de la pensée qui en épouse les dynamismes. Simondon est donc celui qui réhabilite en philosophie l'analogisme comme démarche méthodique, car l'analogisme dans la pensée dépasse la simple association d'idées, en déterminant des invariants opératoires qui dépassent la nature des termes qu'ils mettent en relations. La découverte de ces invariants autorise des transferts valides entre champs ontologiques sans avoir présumé au commencement de la recherche qu'ils dériveraient d'un modèle ontologique commun⁴¹⁸.

Simondon fait d'ailleurs remonter cette découverte d'invariants autorisant la connaissance inductive au *Sophiste* de Platon, lorsque Platon montre qu'il y a analogie opératoire entre l'opération de séduction du sophiste et l'opération de capture fructueuse du pêcheur à la ligne⁴¹⁹. Opération de séduction et opération de capture fructueuse ne sont pas des opérations *identiques*, mais des opérations *équivalentes* : elles ne renvoient

⁴¹⁷ G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit.

⁴¹⁸ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 532.

⁴¹⁹ *Ibid.*

pas à un *rapport d'identité*, mais à une *équivalence de rapports opératoires*. Autrement dit, l'individuation d'un réel extérieur au sujet connaissant est fondée sur l'analogie opératoire entre le réel pensé dans son effectivité et l'effectivité de la pensée en acte qui le pense. C'est pourquoi la transduction chez Simondon est un concept qui a un statut à la fois métaphysique, logique et méthodologique.

Le second schème provient d'un autre paradigme scientifique. C'est celui des systèmes métastables, issu de la thermodynamique des états loin de l'équilibre. Mais on peut affirmer que le paradigme principal, la souche commune de tous les paradigmes dans sa philosophie, c'est bien celui des systèmes métastables, dans la mesure où il permet de penser un état du réel, donc un état de l'être : celui de la potentialité. Par système, il faut entendre un domaine complet de l'être. Un domaine complet de l'être est un domaine limité du réel, porteur de potentiels, donc susceptible de transformations internes. Dans cette mesure, un système est ce dont on peut comparer l'état initial avant transformations et l'état final après transformations⁴²⁰.

Or le paradigme des systèmes métastables est selon Simondon le paradigme physique qui permet de penser le devenir de l'être. *Le paradigme des systèmes métastables est donc selon lui celui qui autorise un renouvellement de la pensée du devenir de l'être*. De plus, c'est un paradigme qui permet de penser le mode d'être du problématique. Simondon transforme radicalement la problématique philosophique, parce qu'il oblige à repenser la notion de problème à partir de ce que nous fait découvrir la science. Avec Simondon, tous les problèmes sont transformés, parce que ce que sa philosophie nous fait sentir réellement, c'est le caractère problématique de l'être. À partir de la physique contemporaine, il transforme radicalement la problématique philosophique et en même temps il renoue avec la problématique fondamentale de la philosophie : celle de l'être. Le paradigme des systèmes métastables est donc le paradigme à partir duquel Simondon

⁴²⁰ G. Simondon, « Analyse des critères de l'individualité », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 528.

légitime un dépassement de l'opposition de l'être et du devenir en déterminant la condition de possibilité du devenir de l'être comme résolution à partir d'un état d'incompatibilité porteur de potentiels qu'on appelle depuis Wiener la *métastabilité*⁴²¹. Ce paradigme permet donc de penser la résolution effective de problème dans le cadre d'une nouvelle théorie de la causalité où le devenir est intégré à l'être et où la résolution est pensée comme dépassement des incompatibilités avec maintien d'une métastabilité.

3.3 Conclusion

En donnant une valeur ontologique à la relation de façon explicite de façon non arbitraire comme le fait Simondon (dans la mesure où l'adoption de ce postulat est légitimée par l'existence de la physique atomique contemporaine), on se donne comme postulats l'analogicité et la réflexivité du réel. Si la relation « a valeur d'être » comme l'écrit Simondon, alors la relation entre deux relations a elle-même valeur d'être, donc l'analogie a valeur d'être. Pour que l'intuition d'une telle relation, entendue comme saisie intelligible dans un acte de compréhension irréductible à un acte d'interprétation d'un énoncé linguistique signifiant, ait elle-même valeur d'être, il faut donc qu'elle soit elle-même une relation. L'intuition analogique est donc l'acte qui rend possible la saisie de la relation entre deux relations.

À partir de ce constat simplement logique, on peut formuler l'hypothèse suivante : la « jugement par perception intuitive » dont parlait Goethe⁴²² désigne une telle saisie analogique réelle. Cette saisie correspond à l'analogie réelle entre le devenir du sujet connaissant et le devenir des objets connus qu'il met en relation dans le processus de recherche et d'apprentissage qu'il met en œuvre dans le cadre d'une réflexion paradigmatique, c'est-à-dire d'une réflexion qui n'est pas spéculation, mais subordination à l'analyse d'un objet réel.

⁴²¹ N. Wiener, *La Cybernétique*, *op. cit.*

⁴²² J. W. von Goethe, « Anschauende Urteilskraft », *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, *op. cit.*

Le jugement par perception intuitive dont parlait Goethe serait donc une opération analogique entre au moins trois opérations : deux opérations objectives et une opération subjective, comme en témoigne l'exemple du *Sophiste*, dont un système d'inscriptions diagrammatique permet d'exhiber selon nous l'« équivalence transopératoire⁴²³ », c'est-à-dire l'analogie réelle de fonctionnement à travers cette machine sémiotique qu'est un diagramme.

En couplant ces deux postulats ontologiques simondoniens aux principes de la sémiotique de Peirce, nous visons à montrer que dès lors que les formes (*i.e.* les modalités par lesquelles les signes connaissent leurs objets) excèdent la quantité nécessaire pour définir le déjà connu, alors elles apportent un supplément de connaissance⁴²⁴. Tout l'intérêt de mobiliser les concepts hérités des pensées de Peirce et Simondon réside dans le fait que dans certaines conditions expérimentales, l'augmentation de la connaissance au sens de Peirce va procéder d'un phénomène d'amplification au sens de Simondon, c'est-à-dire d'une tension d'information ouverte à une prise de forme. Or une telle prise de forme est simultanément une opération d'individuation et une opération de communication qui induit augmentation et croissance.

L'enjeu est ainsi de parvenir à une compréhension du diagramme comme système de signes motivés véhiculant de l'information qui n'est pas réductible à du signal ou à du code. Il s'agit ainsi de circonscrire un nouveau concept d'information à travers l'analyse de cet objet graphique qu'est un diagramme, dans le sillage des travaux de Simondon.

L'enjeu théorique de ce programme de travail est celui du statut scientifique de la connaissance, dont la question directrice est celle de savoir dans quelle mesure science et connaissance peuvent s'unir dans un langage et une écriture qui leur sont communs. Son enjeu pratique est celui de l'apprentissage de savoir-faire au sens fort, à travers une

⁴²³ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 531.

⁴²⁴ J.-M. Chevalier, « Design et sémiotique : entretien avec Jérôme Vogel », *Cahiers philosophiques*, vol. 150, n° 3, 2017, p. 153-159.

activité de lecture et d'écriture diagrammatiques dont les procédures effectives sont des opérations analogiques effectuées sur des signes motivés.

BILAN DU CHAPITRE 8

L'universel est une unité d'analogie incarnée dans un *exemple* qui peut être pris comme *paradigme*, c'est-à-dire comme modèle hypothétique transposable dans un autre domaine de réalité. Si la pensée, dans ses opérations internes, soutient un rapport analogique entre le domaine de réalité connu et le domaine de réalité pris comme objet de recherche, l'« équivalence transopératoire » (Simondon) vérifiée entre les deux domaines fournit la preuve d'une *identité de rapports* moyennant éventuellement un facteur d'échelle. On tient là un principe de progression épistémique logiquement valide et non phénoménologique (encyclopédisme génétique), le modèle d'une théorie de la découverte (méthode analogique) ainsi que le fondement d'une épistémologie des opérations génétiques (théorie générale de l'ontogenèse).

PLAN DU CHAPITRE 9

Dans la mesure où le diagramme désigne l'exécution effective d'un schéma de résolution incalculable, nous soutenons dans un premier temps qu'il permet de penser un schématisation de l'opération⁴²⁵. Ainsi, le diagramme est bien l'équivalent du schème kantien, c'est-à-dire la traduction en temps et en espace d'un sens, donc d'un concept, qui sans cela serait vide. En effet, le diagramme potentiel, entendu comme schéma matérialisé dans un support, est l'explicitation du sens du concept entendu comme guide de l'action. Dans un deuxième temps, nous montrons pourquoi la classe des jugements effectués par intuition diagrammatique (*i.e.* par une perception intuitive médiatisée par la manipulation d'un diagramme) équivaut à celle des « pas » (*steps*) – l'expression est

⁴²⁵ Ce chapitre est la reprise et l'enrichissement des articles suivants : F. Ferri, « Matérialiser le schème et dynamiser le schéma : penser et agir par le diagramme », *Philosophique 2020*, Hors-série 2020, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. « Annales littéraires », n° 1009, 2020, p. 33-44 ; F. Ferri, « De la pratique mathématique à la philosophie des pratiques : le geste diagrammatique entre théorème et morphogenèse », *Metodo*, vol. 9, n° 1, 2021, p. 97-118. Il a préalablement été élaboré à partir des interventions suivantes : F. Ferri, « Du bricolage de l'évolution à la technique de la nature : théorie de l'information et schématisation de l'opération à partir du paradigme biosémiotique de Jakob von Uexküll », Académie d'été d'Épineuil-le-Fleuriel (15-17 août 2016), lundi 15 août 2016, Épineuil-le-Fleuriel ; F. Ferri, « Morphogenèse et diagramme : construire un schématisation de l'opération à partir de l'hypothèse génétique générale de Simondon », Séminaire « Théorie des catégories et ontologie plate », séance 4, Collège international de philosophie, Lycée Louis-le-Grand, jeudi 30 mars 2017, Paris ; F. Ferri, « Matérialiser le schème et dynamiser le schéma : penser et agir par le diagramme », Ateliers doctoraux « Philosophie et sciences » (sous le parrainage de B. Bachimont), organisés par le laboratoire *Logiques de l'Agir*, 2^e volet : jeudi 5 octobre 2017, Besançon ; F. Ferri, « Le schématisation diagrammatique de la morphogenèse », Colloque international « Forme & diagramme : problèmes de morphogenèse dans la pensée, l'art et la nature » (4-5 avril 2019), organisé par les laboratoires *CRIT* et *Logiques de l'Agir*, Université de Franche-Comté, UFR SLHS, vendredi 5 avril 2019, Besançon ; F. Ferri, « Penser le diagramme comme dispositif sémio-technique avec Peirce et Simondon », Journée d'études « Ontologie et analogie », organisée par le Centre International des Études Simondoniennes (CIDES), MSH Paris Nord, vendredi 24 mai 2019, La Plaine Saint-Denis ; F. Ferri, « Analogie et ingénierie sémiotique : vers un nouvel âge de la science », Colloque « Les puissances de l'analogie : perspectives croisées sur l'imagination inventive », UFR SLHS, jeudi 20 mai 2021, Besançon.

de Peirce – effectués dans l’effort de production théorématique. Une telle analyse permet selon nous d’argumenter en faveur de la thèse selon laquelle le schématisme à l’œuvre dans la production organique de la forme est foncièrement de nature diagrammatique, raison pour laquelle nous parlons d’un schématisme diagrammatique de la morphogenèse.

En réhabilitant la valeur épistémique de l’analogie comme opérateur de communication entre ontologie et théorie de la connaissance grâce à la mise en fonctionnement des concepts hérités de la sémiotique de Peirce et de l’ontologie de Simondon, nous légitimons un nouveau programme métaphysique de recherche que nous appelons la diagrammatologie. L’enjeu de ce programme de travail est de montrer que le diagramme, comme outil graphique, possède une effectivité symbolique irréductible à la calculabilité mais saisissable par une conscience. En effet, le diagramme est un outil saisi à travers un geste qui en actualise le sens dans une pratique. C’est un objet robuste qui permet d’articuler une ontologie, une théorie de la connaissance et une philosophie de l’interprétation pour produire une philosophie de l’action, en renouant avec la grande tradition de la *Naturphilosophie*.

**CHAPITRE 9. REPOSER LE PROBLÈME DU SCHÉMATISME
DANS LE CONTEXTE DES DIAGRAMMES**

Introduction

Posé dans les termes de la pensée diagrammatique, le problème du schématisme tel que nous en héritons depuis Kant est selon nous un problème de design d'information graphique. L'objectif du design d'information graphique est de rendre lisible et visible un contenu de connaissance opératoire qui n'est ni réductible à une opération de calcul, ni réductible au savoir véhiculé par les énoncés linguistiques, et dont l'écriture diagrammatique est selon nous le mode d'expression privilégié.

S'il est vrai qu'il existe un type de jugement à l'intersection de l'entendement et de la sensibilité qui participe à la genèse de la connaissance et de son accroissement, et dont les mathématiques sont l'un des théâtres mais pas le seul, la mise en œuvre d'un tel type de jugement passe par la manipulation d'un certain type de représentations, les représentations diagrammatiques, à l'intérieur d'un espace de manipulation d'inscriptions symboliques. Cette manipulation n'est pas simplement l'œuvre de la main qui dessine et qui trace, elle est aussi celle de l'œil qui saisit un contenu opératoire figuré apte à commander le geste technique efficace du corps interprétant au travail.

L'affirmation de l'existence d'un tel type de jugement permet selon nous de reposer le problème du schématisme en termes de pratiques graphiques au sein de l'espace sémiotique en question. Dans ce cadre, le problème du schématisme peut se reposer comme étant celui d'une imagination diagrammatique qui opère une mise en forme de la connaissance à travers un support d'inscription enrôlant des formes sémiotiques d'expression. Posé en ces termes, le problème du schématisme est selon nous un problème de design de l'information visant à véhiculer un contenu de connaissance opératoire qui n'est pas réductible à une opération de calcul.

1. Matérialiser le schème et dynamiser le schéma

En couplant la théorie du support⁴²⁶ à l'ontogenèse, c'est-à-dire une théorie matérialiste et sémiotique de la connaissance à la théorie générale des processus d'individuation conceptualisée par Simondon⁴²⁷, nous visons à montrer deux choses. D'une part que l'inscription diagrammatique correspond à l'enregistrement de la connaissance opératoire ; d'autre part que la connaissance opératoire correspond à l'intuition et à l'actualisation analogiques de l'inscription diagrammatique au cours d'une lecture qui est un faire. Dès lors, nous montrerons que matérialiser le schème, c'est critiquer l'idéalisme transcendantal, et que dynamiser le schéma, c'est révéler en quoi le schématisme participe d'une activité pratique où le sujet connaissant ne soumet pas l'expérience aux pouvoirs de ses facultés, mais ouvre ses facultés aux puissances de l'expérience, à travers un type d'intuition qui tire sa source dans les écrits morphologiques de Goethe.

1.1 Reposer le problème du schématisme à partir de Simondon

Quelles sont les règles par lesquelles l'esprit est conduit à opérer la synthèse d'une diversité de données sensibles dans l'unité d'un concept pensé, dont la conséquence ultime est l'obtention d'une connaissance effective d'un objet de l'expérience réelle ? Ce problème, qui est au cœur de la théorie de la connaissance de Kant, et que l'on trouve formulé dans la *Critique de la raison pure*, porte un nom : le schématisme. La doctrine

⁴²⁶ La théorie du support est une théorie matérialiste et sémiotique de la connaissance qui a été élaborée par Bachimont. Elle se fonde sur la thèse selon laquelle la connaissance correspond à l'interprétation d'une inscription, et l'inscription, à l'individuation de la connaissance. Elle nous fournit donc l'ancrage matériel idoine pour élaborer notre programme de recherche nommé *diagrammatologie*, qui est une philosophie de la pratique de manipulation de symboles scriptovisuels visant à articuler ontogenèse et « scriptogenèse », c'est-à-dire devenir de l'être et genèse de la forme à travers esquisses, formalisation et codification de diagrammes (dont la fonction et de ressaisir des totalités signifiantes en devenir). Un abrégé de la théorie du support se trouve dans le mémoire suivant : B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique*, op. cit., p. 61-117.

⁴²⁷ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit.

kantienne du schématisme pose qu'il existe des représentations intermédiaires entre les représentations singulières de l'intuition sensible grâce auxquelles nos intuitions ne sont pas vides, et les représentations générales de l'entendement, grâce auxquelles nos concepts ne sont pas aveugles⁴²⁸. Autrement dit, le schématisme est une condition nécessaire à l'obtention de la connaissance d'un objet de l'expérience possible. Pourtant, ce n'est pas parce que nous connaissons quelque chose que nous pouvons rendre compte du *comment* de cette connaissance, c'est-à-dire de l'*opération* faisant advenir cette connaissance. L'opération de connaissance dans la théorie de la connaissance kantienne, comme l'opération technique de la prise de forme dans la théorie de la causalité aristotélicienne⁴²⁹, restent toutes les deux des mystères, car elles sont pensées *a posteriori* comme *résultat* de la synthèse :

- réunion d'une matière et d'une forme via une cause finale et une cause efficiente dans le cas aristotélicien ;
- congruence d'une forme sensible et d'une forme intelligible rendue possible par un monogramme biface dans le cas kantien, à savoir le schème.

L'opération kantienne et l'opération aristotélicienne ne sont donc pas pensées comme le *principe* de la synthèse, mais comme son *résultat*. L'enjeu d'une pensée de l'opération comme principe, c'est alors de trouver le lieu où convergent une réalité première et un critère de vérité, en deçà de la distinction du sujet et de l'objet. En effet, le sujet et l'objet ne sont pas les catégories originaires de la connaissance, mais les produits dérivés d'un rapport de force plus profond entre pensée et expérience qui est médiatisé par une opération. Sujet et objet sont les dénominations de deux systèmes de relations qui entrent en contact pour s'entre-saisir. La catégorie fondamentale de la connaissance devient ainsi celle d'opération. Si cette catégorie est si fondamentale dans la théorie de la connaissance, c'est parce que la connaissance doit conduire à l'*action* et que l'action n'est plénière que

⁴²⁸ E. Kant, *Critique de la raison pure*, op. cit, p. 144.

⁴²⁹ M. Heidegger, « La question de la technique », *Essais et conférences*, op. cit.

si elle est médiatisée par la saisie consciente et réfléchie de l'*opération* dans l'individuation de la connaissance telle qu'elle s'opère au cours de la lecture d'un diagramme⁴³⁰. L'individuation de la connaissance est intuition de l'opération, opération analogique en train de se faire, ou en terme simondonien, « transduction » en train de se faire, modulation au contact même de l'être qui m'informe, et qui m'informant, me transforme dans le devenir⁴³¹. C'est ce qui produit en moi une mutation graduelle, une métamorphose, une genèse de la forme, c'est-à-dire une morphogenèse.

Ce qui permet selon nous de relier le programme de la diagrammatologie et le problème de la morphogenèse à la théorie simondonienne de l'individuation, c'est le hasard comme concept permettant de penser la rencontre⁴³². Or il y a un concept plus précis que celui de hasard qui permet selon nous de penser la façon dont les formes communiquent sur un mode non final, mais non dépourvu d'ordre, c'est-à-dire comme bricolage évolutif, donc morphogenèse non programmée, mais cependant contrainte, c'est

⁴³⁰ Pour un partisan de la théorie du support, la connaissance désigne « la capacité d'exercer une action pour atteindre un but » (B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique, op. cit.*, p. 65). Par conséquent, dans ce dispositif théorique, la connaissance et l'action sont réciproques l'une de l'autre.

⁴³¹ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information, op. cit.*, p. 34 : « Nous ne voulons pas dire que la transduction est un procédé logique au sens courant du terme : elle est un procédé mental, et plus encore qu'un procédé, une démarche de l'esprit qui découvre. Cette démarche consiste à *suivre l'être dans sa genèse*, à accomplir la genèse de la pensée en même temps que s'accomplit la genèse de l'objet. » Il y a deux sources du concept de transduction : la bactériologie et la technologie. Suivant le sens bactériologique, la transduction désigne le processus par lequel l'ADN est transféré d'une bactérie à une autre par un virus. Suivant cette acception, elle désigne l'introduction de l'ADN étranger dans le génome d'une cellule hôte via un vecteur viral. Suivant son sens technologique, la transduction renvoie à l'action d'un transducteur, qui désigne une résistance modulable interposée entre une énergie potentielle et le lieu d'actualisation de cette énergie. Chez Simondon, la transduction désigne à la fois une opération intermédiaire entre la déduction et l'induction, et la méthode analogique consistant à suivre l'être à connaître dans sa genèse, pour en avoir une compréhension immanente. Elle désigne donc le mode de propagation d'une structure de proche en proche, structure à la fois structurante et structurée. Réunissant les sens bactériologique et technologique pour donner à cette notion un sens ontogénétique, Simondon en fait un concept méthodologique destiné à comprendre le processus d'invention dans le devenir de l'être. Sur l'origine de ce terme, voir : A. Gualandi, « La renaissance des philosophies de la nature et la question de l'humain », in P. Maniglier (dir.), *Le moment philosophique des années 1960 en France*, Paris, Presses universitaires de France, 2011, p. 66, n. 2. B. Morizot a vu la pertinence qu'il y avait à rapprocher la transduction au sens de Simondon de l'*habitus* au sens de Bourdieu. Sur ce rapprochement, voir : *Pour une théorie de la rencontre, op. cit.*, p. 187-210. Sur la définition de l'*habitus* comme structure structurante et structurée, voir : P. Bourdieu, *Le sens pratique*, Paris, Éditions de Minuit, 1980, p. 88-89.

⁴³² B. Morizot, *Pour une théorie de la rencontre, op. cit.*

le concept de chaîne de Markov, tel qu'il a été généralisé par Ruyer dans *La genèse des formes vivantes*⁴³³ puis repris par Deleuze et Guattari dans *L'Anti-Œdipe*⁴³⁴. Pourquoi ? Parce qu'il permet de penser un ordre semi-aléatoire à toutes les échelles : matérielle, biologique, culturelle et historique⁴³⁵.

Mais l'individuation n'est pas seulement le produit d'un ordre semi-aléatoire, c'est aussi le travail de la répétition opératoire et la recherche de l'opération dans l'être pour le comprendre et l'effectuer⁴³⁶. L'individuation est donc inséparable d'un schématisme que nous nommons *schématisme opératoire*. Nous pensons que ce schématisme peut être esquissé par un diagramme, lui-même porté par une sténographie à la fois conceptuelle et iconique. Car comme l'a montré Netz⁴³⁷, lorsque ces autodidactes, les premiers mathématiciens grecs, commencèrent à pratiquer cette nouvelle façon de mettre en forme un argument qu'on appellera plus tard un théorème, ils pensèrent non seulement à haute voix en n'utilisant que quelques centaines de mots structurés en formules constamment répétées, mais ils fixèrent conjointement leur attention sur des diagrammes qu'ils annotèrent avec des lettres. C'est de cette façon qu'ils finirent par accéder à cette procédure épistémologique dont on pourrait croire qu'elle est sans histoire. Cette procédure, c'est le transfert de nécessité effectué dans le raisonnement démonstratif. Autrement dit, deux opérations techniques ont été au principe génétique de la mise en forme de l'opération rationnelle par excellence : la déduction. Ces deux opérations techniques graphiques sont l'enregistrement des ressources cognitives visuelles opéré au

⁴³³ R. Ruyer, « Formations ouvertes et jargons markoviens », *La genèse des formes vivantes*, Paris, Flammarion, 1958, ch. 8.

⁴³⁴ G. Deleuze & F. Guattari, *L'Anti-Œdipe*, *op. cit.*, p. 342-344.

⁴³⁵ Sur cette question voir : A. Sauvagnargues, « Codage machinal et sémiotique », *Deleuze et l'art*, Paris, Presses universitaires de France, 2005, ch. 7.

⁴³⁶ L'individuation désigne selon Simondon la manière dont un individu devient ce qu'il est, à travers l'actualisation de la charge de réalité pré-individuelle dont est porteur le milieu d'où il sort. Ces potentiels sont ce qui rend ce milieu « métastable », c'est-à-dire susceptible de transformations sans dégradation énergétique, à travers l'actualisation de ces potentiels, grâce à une incidence d'information : ce qu'on appelle le devenir de l'être, qui s'exprime à travers l'actualisation et la persistance temporelle plus ou moins longue de réalités individuées, aux différents ordres de grandeur de l'univers.

⁴³⁷ R. Netz, *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics*, *op. cit.*

moyen de diagrammes et l'enregistrement des ressources linguistiques opéré au moyen d'un vocabulaire fini.

Il y a donc, comme l'a très bien identifié Simondon, une « zone obscure » dans la théorie kantienne de la connaissance⁴³⁸, et elle ne concerne pas « l'étude des formes extrêmes des conditions du savoir, la sensibilité et l'entendement⁴³⁹ », mais l'imagination. Selon nous, le schématisme qui a lieu dans cette zone obscure est le schématisme opératoire de l'imagination diagrammatique. Tout l'enjeu de la sténographie diagrammatique devient celui de *capter* l'opération pour l'enregistrer et en garder la trace.

1.2 Réalisme ontologique des relations et intuition analogique

Saisir l'unité de l'être, c'est donc faire reconverger le sujet et l'objet, et saisir leur point de rencontre exceptionnel. Suivant le Simondon de la troisième partie de *Du mode d'existence des objets techniques*, nous soutenons que le mode de connaissance d'une telle saisie est l'intuition, et que l'intuition est le mode de connaissance philosophique⁴⁴⁰. De plus nous soutenons que le contenu de cette intuition est la relation analogique. Or une relation analogique est une identité de rapports opératoires⁴⁴¹. Si l'on postule que la relation a valeur d'être, alors la relation entre deux relations a elle-même valeur d'être,

⁴³⁸ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 24 et 30.

⁴³⁹ G. Simondon, « Étude de quelques problèmes d'épistémologie et de théorie de la connaissance », in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, *op. cit.*, p. 211.

⁴⁴⁰ Sur l'intuition comme mode de connaissance philosophique, voir : G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 321-325.

⁴⁴¹ Sur l'analogie comme « identité de rapports opératoires » (et non comme « identité de rapports structuraux »), voir : Simondon, « Allagmatique », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 529-536 ; mais aussi « Cybernétique et philosophie » (1953), in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *Sur la philosophie*, *op. cit.*, p. 42 ; ainsi qu'« Épistémologie de la cybernétique » (1953), in I. Saurin & N. Simondon (éd.), *op. cit.*, p. 186-187. La source de Simondon concernant cette distinction semble être : Mgr Bruno de Solages, *Dialogues sur l'analogie*, Paris, Aubier, 1946. Simondon l'évoque explicitement dans *L'individuation*, p. 108.

donc l'analogie a valeur d'être⁴⁴². Pour que l'intuition ait elle-même valeur d'être, il faut donc qu'elle soit elle-même une relation. L'intuition est donc la relation qui rend possible la saisie de la relation entre deux relations. Par conséquent l'intuition philosophique est l'*analogie réelle* entre le devenir du sujet et le devenir des objets qu'il met en relation. Elle désigne la saisie de l'analogie opératoire entre deux relations objectives comme *opération analogique* effectuée par le sujet connaissant. Elle est donc une analogie entre au moins trois opérations : deux opérations objectives et une opération subjective.

Autrement dit, reposer le problème du schématisme en terme diagrammatique, cela signifie selon nous questionner une conception de la synthèse tacitement pensée comme réunion d'une matière et d'une forme dont on justifie l'adéquation *a posteriori* par la notion de schème. Nous postulons donc que la synthèse et le schématisme se réciproquent l'un et l'autre dans un processus commun d'individuation qui passe par la médiation d'un support. Autrement dit, nous postulons que le schématisme est une synthèse en devenir, et la synthèse, un schématisme en construction⁴⁴³. Par conséquent, l'impensé du schématisme kantien comme de l'hylémorphisme aristotélicien, c'est l'opération :

- d'une part l'opération en tant qu'elle rend effective l'individuation par le sujet d'un réel qui lui est extérieur (individuation qui est alors source de connaissance nouvelle) ;

⁴⁴² Ce postulat métaphysique est nommé « réalisme des relations » et prend sa source dans l'ontologie et l'épistémologie bachelardiennes. Sur cette question, voir : J.-H. Barthélémy, *Simondon ou l'encyclopédisme génétique*, *op. cit.*, ch. 1 ; ou encore : J.-H. Barthélémy et V. Bontems, « Relativité et réalité : Nottale, Simondon et le réalisme des relations », *art. cit.*

⁴⁴³ Un tel schématisme pratique de l'imagination, V. Beaubois le voit à l'œuvre dans l'élaboration de la pensée simondonienne du schème, entre *Du mode d'existence des objets techniques* (1958) et le cours publié sous le titre *Imagination et invention* (1965-1966). Cette conception du schématisme permet de comprendre la spécificité du design comme activité de production d'« objets-images » (Simondon) et de diagrammes. Sur toutes ces questions, voir : V. Beaubois, « Un schématisme pratique de l'imagination », *Appareil*, n° 16, 2015 ; mais aussi V. Beaubois, « Ethnographies du design. Vers une diagrammatisation de la conception », *Techniques & Culture*, vol. 64, n° 2, 2015, p. 48-63 ; ainsi que T. Deldicque et V. Petit, « La recherche en design avant la "recherche en design" », *Cahiers COSTECH*, n° 1, 2017.

- d'autre part l'opération en tant qu'elle rend effective une construction objective (comme une pièce de bois posée sur une table attend son insertion dans un ensemble en voie de construction).

L'impensé en question, c'est l'opération comme *principe d'individuation* et comme *geste technique* de construction. Reposer le problème du schématisme en termes d'opérations, c'est alors exiger une réponse aux deux séries de questions suivantes :

- comment l'individuation d'un réel extérieur au sujet est-elle non seulement possible, mais aussi enregistrable sur un support de savoir de telle sorte qu'elle soit universellement communicable ? Cette question est une façon de reposer en des termes nouveaux le problème du synthétique *a priori*. Elle concerne entre autres choses le statut de la connaissance mathématique.
- Qu'est-ce qu'un schème opératoire ? Comment peut-il être matérialisé pour devenir universellement appropriable et ingénieusement combinable dans une activité d'invention ? Ces questions concernent par exemple le statut de la connaissance technique et technologique.

1.3 Ancrage matériel des schèmes et herméneutique opératoire des schémas

Matérialiser le schème, c'est oser une réfutation de l'idéalisme transcendantal. Dynamiser le schéma, c'est montrer en quoi le schématisme participe d'une activité pratique où le sujet ne soumet pas l'expérience aux pouvoirs de ses facultés, mais ouvre ses facultés aux potentialités de l'expérience. Nous soutiendrons la thèse suivante pour répondre aux questions énoncées plus haut : en se donnant comme seul postulat ontologique un postulat d'analogicité et de réflexivité du réel entre les différents régimes d'individuation (ce qui est la démarche employée par Simondon dans *L'individuation*), c'est-à-dire en postulant que « la relation a valeur d'être », la connaissance de tous les schématismes opératoires devient possible par la médiation des opérations de la pensée. Car la connaissance d'un schématisme opératoire peut équivaloir à une série d'opérations

en vertu d'une relation analogique, si l'on entend par analogie non un rapport d'identité, mais une identité de rapports, et une identité de rapports non pas structuraux, mais opératoires. Cette relation analogique peut être figurée par un diagramme, en vertu de son caractère iconique.

Dès lors, matérialiser le schème, ce sera symboliser les opérations techniques par des *schémas* et symboliser les schèmes opératoires par des *diagrammes*. Apprendre et se cultiver, ce sera actualiser analogiquement les schèmes humains réels, c'est-à-dire les opérations techniques de l'homme au travail, en opérant une anamnèse dans l'immanence⁴⁴⁴, que nous nommons *anamnèse analogique*. Cette anamnèse définit selon nous l'appropriation au principe d'une authentique réinvention. Elle est à l'œuvre dans le processus d'apprentissage conçu comme un processus d'individuation qui élève et augmente notre puissance d'agir dans tous les domaines de la connaissance.

Or cette matérialisation du schème, elle trouve son initiation dans le projet encyclopédique. L'encyclopédie est un modèle de société ouverte et d'émancipation intellectuelle et pratique, car elle révèle les secrets des corporations en publiant les opérations des métiers⁴⁴⁵. C'est une structure de passage dans sa réalisation matérielle, car elle est nécessairement inachevée. Mais sa force se perpétue car sa finalité est de s'incarner dans une civilisation⁴⁴⁶. Son langage est celui du « geste figuré », puisqu'elle publie les opérations artisanales. C'est pourquoi ce langage est schématique, proto-diagrammatique. Il devient diagrammatique à l'époque technoscientifique des ensembles

⁴⁴⁴ L'anamnèse désigne originellement l'opération platonicienne de la réminiscence, c'est-à-dire la restauration de l'Idée contemplée avant notre vie terrestre incarnée. Par l'expression « anamnèse dans l'immanence » nous désignons l'opération de réactualisation de l'effectivité d'un schème opératoire, qui ne désigne ni une Idée transcendante (idéalisme platonicien), ni un sens idéal situé au bout d'une visée intentionnelle (idéalisme phénoménologique husserlien), mais une virtualité immanente en attente d'actualisation ou de réactualisation.

⁴⁴⁵ G. Simondon, « Les encyclopédies et l'esprit encyclopédique », in I. Saurin & N. Simondon (éd.) *Sur la philosophie, op. cit.*, p. 119.

⁴⁴⁶ *Ibid.*

industriels, essentiellement pour des raisons d'échelle⁴⁴⁷. L'encyclopédie est donc un « relais amplificateur », un réservoir de virtualités et un germe pouvant engendrer des processus psycho-sociaux d'inventions individuelles et collectives, une fois l'information diagrammatique appropriée⁴⁴⁸.

Ce dont est porteuse l'information diagrammatique, c'est d'un savoir-faire enregistré et conservé. Or opérer, c'est agir pratiquement en portant avec soi le savoir-faire. On peut nommer *diagrammatologie* la phénoménologie du sens pratique objectivé et abrégé dans des systèmes d'écriture visuels. C'est une description de la conscience du temps de la pratique, telle que cette pratique apparaît discrétisée par des schémas qui en symbolisent les opérations élémentaires. Cet effort diagrammatique, il n'est pas nouveau, il a souvent existé en période prérévolutionnaire. C'est l'effort encyclopédique qui cherche à drainer avec lui toutes les forces sociales d'un peuple, pour faire accéder la minorité, c'est-à-dire tout le monde⁴⁴⁹, à la majorité, c'est-à-dire à l'état adulte. Cet effort de publication encyclopédique est ce qui rend possible non seulement l'apprentissage autodidactique, c'est-à-dire l'autonomie, mais aussi la poursuite de l'invention,

⁴⁴⁷ « Comprendre le schème d'un moteur ou d'un pont ne peut en revanche passer par une simple incorporation directe. Cela doit passer par un ensemble de « diagrammes » extérieurs qui sont des plans, des modélisations, des schémas, des maquettes, etc. Simondon n'a pas développé explicitement ce thème, mais il nous semble important d'insister sur le fait que c'est par ce biais qu'une modalité affective des schèmes industriels, différente de celle des schèmes artisanaux, est rendue possible... » (V. Beaubois, « Un schématisme pratique de l'imagination », art. cit., §27). Sur les enjeux du développement d'une épistémologie des relations d'échelle à partir de la pensée simondonienne (multiscale) des ordres de grandeur, voir : V. Bontems, « Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon », *Appareil*, n° 2, 2008.

⁴⁴⁸ On doit à Otto Neurath (1882-1945) et Marie Neurath (1898-1986) l'invention d'un système de notation typographique nommé ISOTYPE (International System of TYpographic Picture Education), destiné à développer l'éducation par l'image typographique et à favoriser la démocratisation de la connaissance. On trouve une présentation condensée des principes fondamentaux de ce système d'écriture diagrammatique dans : M. Neurath & R. Kinross, *Le transformateur : principes de création des diagrammes Isotype*, Paris, B42, 2013. Sur le projet encyclopédique et social de Neurath, voir : D. Lelarge, *L'encyclopédie sociale d'Otto Neurath*, op. cit.

⁴⁴⁹ On renvoie ici au propos de Gilles Deleuze dans *L'Abécédaire* qui consiste à dire qu'être de gauche, c'est considérer que « la minorité c'est tout le monde » et que « la majorité, c'est personne ». Voir « G comme Gauche », *L'Abécédaire de Gilles Deleuze*, avec Claire Parnet, produit et réalisé par P.-A. Boutang, Éditions Montparnasse, 1996.

individuelle et collective. C'est pourquoi à la devise de la Royal Society (« *Nullius in verba*⁴⁵⁰ ») ainsi qu'à celle des Lumières (« *Sapere aude*⁴⁵¹ ») on pourrait en ajouter une nouvelle : « Ose regarder et ose faire ». Ce serait la devise de la diagrammatologie dont le système d'écriture est la diagrammatique⁴⁵². Car la diagrammatique est ce qui entend montrer, poser et donner l'autonomie de la pensée pratique.

Le diagramme, c'est à la fois le « schème dynamique » (Bergson) tel qu'il est fossilisé dans un support d'inscription (qui peut être le corps propre, mais aussi une planche encyclopédique, un diagramme physico-mathématique comprimant un geste théorique, etc.) et l'exécution temporelle de cette structure inscrite matériellement. En s'actualisant en une séquence de gestes, le diagramme se fait schème mobile et plastique, c'est-à-dire mise en mouvement adaptée à différentes situations. C'est donc un squelette de relations intelligibles qui peut être transposable dans des situations analogues⁴⁵³. C'est pourquoi Deleuze et Guattari ont pu parler d'une écriture « transcursive », « à même le Réel⁴⁵⁴ », lorsqu'ils mobilisèrent un concept de diagramme pour penser l'histoire en train de se faire. Le *transcursif*, on peut affirmer que c'est ce qui prolonge le *discursif* et l'*iconique*

⁴⁵⁰ « Ne croire personne sur parole », telle est la devise de la Royal Society, société savante fondée à Londres en 1660.

⁴⁵¹ « *Sapere aude* ! Aie le courage de te servir de ton propre entendement ! Telle est la devise des Lumières » (E. Kant, *Réponse à la question : qu'est-ce que les Lumières?*, 1784, §1).

⁴⁵² Ce qu'un cartographe peu connu et dont on réédite un livre visionnaire appelait il y a un peu plus de quarante ans la « Graphique ». Voir : J. Bertin, *La graphique et le traitement graphique de l'information* (1977), Bruxelles, Zones Sensibles, 2017.

⁴⁵³ C'est ce qu'avait saisi Bourdieu à travers cette remarque : « Il faut ainsi aller de l'*ergon* à l'*energeia*, suivant l'opposition de Wilhelm von Humboldt, des objets et des conduites au principe de leur production ou, plus précisément, de l'analogie ou de la métaphore effectuée, fait accompli et lettre morte que considère l'herméneutique objectiviste, à la pratique analogique comme transfert de schèmes que l'*habitus* opère sur la base d'équivalences acquises, facilitant la substituabilité d'une réaction à une autre et permettant de maîtriser par une sorte de généralisation pratique tous les problèmes de même forme pouvant surgir dans des situations nouvelles. » (P. Bourdieu, *Le sens pratique*, *op. cit.*, p. 158).

⁴⁵⁴ G. Deleuze & F. Guattari, *L'Anti-Œdipe*, *op. cit.*, p. 47. Sur le diagramme tel qu'il est conceptualisé par Deleuze dans sa dimension infra-historique, voir : I. Krtolica, « Diagramme et agencement chez G. Deleuze. L'élaboration du concept de diagramme au contact de Foucault », *Philosophy and Society*, vol. 20, n° 3, 2009, p. 97-124.

dans le *kinesthésique*, sur un théâtre d'opérations. On peut ainsi qualifier de transcursive l'opération de déterritorialisation/reterritorialisation d'un support vers un autre, par exemple d'un support livresque vers un support terrestre présent dans le monde. Une telle opération est ce qui permet de sortir du cercle herméneutique pour entrer dans l'ordre de l'action.

Le diagramme est donc le schème opératoire tel qu'il peut être rendu visible par la bi-dimensionnalité de la graphie, et tel qu'il doit susciter la transduction analogique de la pensée tournée vers l'action (acte d'intelligibilité inventif), qu'il faut comprendre comme la reproduction abrégée du schématisme opératoire de l'être connu. L'autorité du diagramme lui vient donc de sa lisivisibilité⁴⁵⁵. La « lisivisibilité » du diagramme est ce qui amorce son opérativité dans un acte de lecture/écriture. Grâce au diagramme, la phénoménologie se transmue en phénoménographie, la phénoménographie, en phanérosopie⁴⁵⁶, et la phanérosopie, en kinesthésie. On peut ainsi nommer *kinesthèse* le moment définissant la conversion de la systématique figée des structures (sédimentées dans des schémas et des diagrammes) en un schématisme temporel d'exécution (suite de gestes coordonnés), qui est un acte d'interprétation et un acte d'émancipation. Car la bonne interprétation est celle qui permet de poursuivre le travail herméneutique au-delà de la lettre et plus généralement du « gramme », et de sortir de l'interprétation infinie

⁴⁵⁵ Par l'usage de ce mot-valise, on veut signifier que l'écriture diagrammatique rend possible un nouveau type de lecture : une lecture où le lisible et le visible ne font qu'un, et où le contenu visible ne renvoie pas à un sens idéal, mais à un schème symbolique matériellement inscrit. L'invariant matériel stabilisé symboliquement est l'opposé d'un sens idéal. C'est pourquoi le diagramme, en tant qu'il est « lisivisible », c'est-à-dire simultanément lisible et visible, est un « phénoménogramme » : il s'agit d'un schème dont on a extrait l'invariant opératoire, grâce à l'équivalent iconique d'un verbe. C'est l'équivalent matériel de ce que le fondateur de la phénoménologie, Husserl, appelle une « essence » ; essence qui est dégagée chez lui au terme des procédés qu'il nomme « variation eidétique » et « réduction phénoménologique ». Sauf que le problème de la variation eidétique husserlienne, c'est qu'elle est opérée par une subjectivité consciente de manière privée. Or c'est cela qui pose problème dans la phénoménologie. La phénoménographie qu'est la diagrammatologie est une critique de la phénoménologie. Car cette essence, il faut la rendre publique pour qu'elle devienne commune, partageable et constatable par une pluralité de consciences, au-delà de la seule catégorisation linguistique et conceptuelle opérée par la médiation du langage verbal. L'enjeu, c'est qu'il faut rendre visible l'essence (phénoméno-) par la médiation d'une inscription (-gramme) : d'où phénoménogramme.

⁴⁵⁶ Phanérosopie est le nom que Peirce a donné à sa phénoménologie de la connaissance.

pour entrer dans l'ordre de l'action pratique. Nous nommons une telle activité herméneutique, fondée sur une modulation analogique, orientée vers l'avenir en direction de la pratique inventive dans tous ses domaines d'expression : *herméneutique opératoire*.

1.4 Simplexité diagrammatique versus complexité calculatoire

Tous les travaux d'Alain Berthoz en neurophysiologie de la perception et de l'action vont dans ce sens, en particulier sa théorie de la simplexité, qui évite les écueils de la simplicité et de la complexité⁴⁵⁷. Dès lors, le schéma intelligible (diagramme virtuel) peut être actualisé dans une forme dynamique (diagramme opérationnel), qui est l'expression d'une activité herméneutique opératoire, d'essence diagrammatique, c'est-à-dire qui n'est ni réductible à un calcul programmatique ni réductible à une syntaxe algorithmique. Cette diagrammatique, Simondon lui a donné un nom : l'*allagmatique* ou théorie des opérations dans l'être⁴⁵⁸.

Si la diagrammatique n'est ni une algorithmique ni une algèbre de la pensée pure, c'est parce que la maîtrise d'un calcul n'est possible que par sa figuration à travers un diagramme. C'est ce qu'avait compris Galois avant tout le monde, lorsqu'il écrivait :

Il devient de plus en plus nécessaire d'embrasser plusieurs opérations à la fois, parce que l'esprit n'a plus le temps de s'arrêter aux détails. (...) Sauter à pieds joints sur ces calculs ; grouper les opérations, les classer suivant leurs difficultés et non suivant leurs formes ; telle est, suivant moi, la mission des géomètres futurs ; telle est la voie où je suis entré dans cet ouvrage⁴⁵⁹.

Un diagramme, c'est donc aussi la spatialisation d'un calcul qui en révèle la structure. Un diagramme peut donc géométriser un calcul, et ainsi le figurer. Ce peut être la figuration d'un ensemble d'opérations calculables dont la lecture permet leur exécution.

⁴⁵⁷ A. Berthoz, *La simplexité*, Paris, Odile Jacob, 2009.

⁴⁵⁸ G. Simondon « Allagmatique », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, *op. cit.*, p. 529.

⁴⁵⁹ É. Galois, *Écrits et mémoires mathématiques*, p. 9-11, cité par B. Timmermans, *Histoire philosophique de l'algèbre moderne*, *op. cit.*, p. 131.

Dans cette perspective, l'écriture diagrammatique est la *spatialisation* du calcul et la lecture diagrammatique, la *temporalisation* de ce calcul comme interprétation effective ouverte à l'incalculable⁴⁶⁰.

Ce qu'il faut retenir, c'est que la figure géométrique est le paradigme du diagramme⁴⁶¹ car elle peut représenter non seulement des êtres étendus, mais aussi des relations entre des quantités algébriques (en géométrie analytique par exemple) ou encore des relations logiques (comme dans les diagrammes de Venn). Le premier à avoir généralisé la notion de diagramme est Peirce, en dissociant le diagramme de la géométrie comme discipline paradigmatique. Cette dissociation rend possible une intuition sémiotique des symboles à même le support d'inscription, intuition sémiotique à la fois formelle et empirique, puisque commandée par des règles explicites sur des symboles lisibles et visibles. Le diagramme devient dans cette généralisation la formule symbolique pourvue d'un certain degré d'iconicité. L'entrée dans le régime symbolique se caractérise par le fait que les gestes sont commandés par des règles. L'intuition ne disparaît pas, mais elle est structurée et guidée par des règles. Dans le régime symbolique diagrammatique, on est donc à mi-chemin entre l'intuitionnisme pur et le formalisme pur. Par conséquent, le contenu intuitif doit être identifié au contenu iconique des formules spatialisées sur la surface d'inscription. C'est pourquoi la définition de la déduction énoncée par Simondon dans le texte de sa conférence donnée en 1962 au colloque de Royaumont sur *Le concept d'information dans la science contemporaine* prend tout son sens à la lumière de la sémiotique de Peirce, car elle nous permet de comprendre, à la suite des premiers travaux de Netz, pourquoi la déduction est une

⁴⁶⁰ Cette ouverture, Jakob von Uexküll lui avait donné une expression métaphorique : l'attention au signal mélodique de la symphonie cosmique sur lequel régler son comportement. J. v. Uexküll, *Mondes animaux et monde humain*, Paris, Denoël, 1965.

⁴⁶¹ C. Chauviré, « Schématisme et analyticité chez C. S. Peirce », *Archives de philosophie*, vol. 50, n  3, juillet-sept. 1987, p. 422.

pratique graphique correspondant à « un mode contrôlé de transduction sur des symboles ⁴⁶² ».

2. Schématisme et morphogenèse

2.1 Intuition diagrammatique et morphogenèse

Dès lors, reposer correctement le problème du schématisme suppose selon nous de s'armer de la sémiotique iconique de Peirce, diagrammatique de surcroît. La lecture d'un article de Maria Giulia Dondero portant sur la sémiotique visuelle de l'imagerie scientifique nous a conduit à relever une analogie frappante entre le schématisme diagrammatique de la genèse théorématique telle qu'elle s'effectue dans le parcours visuel de la démonstration⁴⁶³, et le troisième moment du schématisme de l'opération morphogénétique, tel que le voit à l'œuvre Simondon dans sa théorie de la résolution des problèmes par dépassement des incompatibilités⁴⁶⁴. Le problème qui se cache derrière cette analogie remonte d'ailleurs au père de la morphogenèse. Il concerne l'émergence des formes et des totalités, dont la saisie est guidée, comme l'écrit Goethe, par un jugement par perception intuitive. D'où notre hypothèse suivante : la classe des jugements effectués par intuition diagrammatique équivaut à celle des pas effectués dans l'effort de production théorématique.

Il est possible de reposer à nouveaux frais la problématique du schématisme en articulant les pensées de Peirce et de Simondon. Dans un premier temps, nous exposons la généalogie du problème du schématisme, qui, dans le sillage de la tradition

⁴⁶² G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit., p. 175, n. 2.

⁴⁶³ M. G. Dondero, « Diagramme et parcours visuel de la démonstration », *Actes sémiotiques*, n° 114, 2011.

⁴⁶⁴ Simondon ouvre d'ailleurs la voie à la mise en œuvre de notre programme lorsqu'il écrit dans « Forme, information, potentiel » (1960), *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 555, n. 10 : « La théorie de la prise de forme par positivisation des incompatibilités de l'expérience devrait permettre de reprendre le problème du schématisme sur des bases nouvelles, et de donner peut-être un sens nouveau au relativisme, en même temps qu'elle fournirait une base pour l'interprétation de tous les processus psychiques de genèse et d'invention. »

philosophique, nous a conduit à l'articuler au moyen des concepts de diagramme et de morphogénèse. Puis nous proposons une lecture de la conférence de Simondon prononcée en 1962 au 6^e colloque de Royaumont sur le concept d'information dans la science contemporaine⁴⁶⁵, afin de démontrer pourquoi on peut affirmer que le schématisme opératoire de la morphogénèse formalisé par Simondon dans cette conférence correspond au déploiement dynamique et vivant d'un diagramme au sens de Peirce. Nous visons ainsi à montrer que diagramme et morphogénèse s'articulent dans le cadre de la problématique du schématisme et ont pour moyen terme la notion de forme.

2.2 Généalogie du problème du schématisme dans la modernité philosophique

La problématique du schématisme remonte à Kant. Elle concerne la production de la connaissance objective au regard du sujet connaissant⁴⁶⁶. Elle renvoie à l'articulation de trois facultés (l'entendement, la sensibilité et l'imagination) et au problème de l'accord entre la reproduction de l'enchaînement des représentations dans l'esprit et celle des phénomènes dans la nature. Elle renvoie donc au problème de l'accord entre la Nature et l'Esprit⁴⁶⁷.

Peirce, à la suite de Kant, a reposé le problème du schématisme dans le cadre d'une réflexion sur le statut de la connaissance mathématique⁴⁶⁸ et de son projet d'une science générale des signes, la sémiotique. Simondon a de nouveau posé le problème du schématisme un demi-siècle après Peirce dans le cadre d'une réflexion sur le vivant et l'invention⁴⁶⁹. Vincent Beaubois a d'ailleurs montré dans un article récent comment et

⁴⁶⁵ G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit., p. 159-176.

⁴⁶⁶ E. Kant, *Critique de la raison pure*, op. cit., p. 224-230.

⁴⁶⁷ G. Châtelet, « Géométrie et philosophie de la nature : la balance dialectique d'Argand-Hamilton », in O. Bloch (dir.), *Philosophies de la nature*, Paris, Éditions de la Sorbonne, 2019, p. 271-278.

⁴⁶⁸ C. Chauviré, « Schématisme et analyticité chez C. S. Peirce », art. cit.

⁴⁶⁹ G. Simondon, « Forme, information, potentiel », *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 554-555, n. 10 : « [...] dans le cas de la perception binoculaire, c'est la disparation des images monoculaires qui les rend incompatibles. Or, c'est précisément ce degré de disparation qui est pris comme indice positif de la distance relative des plans, dans la perception tridimensionnelle. Donc, le

pourquoi on pouvait parler d'un « schématisme pratique » de l'imagination chez Simondon⁴⁷⁰. Il a aussi montré comment cette problématique pratique s'enracine dans une nouvelle discipline de recherche : le design⁴⁷¹.

Articuler les pensées de Peirce et de Simondon, cela signifie pour nous se demander comment la question du vivant peut rencontrer celle du signe. Il y a donc une première porte d'entrée pour tenter d'articuler les pensées de Peirce et de Simondon : celle de la biosémiotique, dont on entend beaucoup parler en France depuis la traduction récente du livre d'Eduardo Kohn, dans lequel ce dernier développe l'idée d'une anthropologie au-delà de l'humain, inspirée de la sémiotique de Peirce et des modes de communication des végétaux et des animaux⁴⁷². Nous pensons pour notre part que c'est plutôt la biosémiotique animale du baron von Uexküll⁴⁷³ qui permet de faire le lien entre le projet de sémiotisation de la philosophie transcendantale kantienne tel qu'il a été amorcé par Peirce dans sa théorie et sa pratique sémiotiques des mathématiques⁴⁷⁴ et le renouveau de la philosophie de la nature amorcé par Simondon dans sa théorie générale des processus d'individuation⁴⁷⁵.

savoir avance en positivant les incompatibilités, en en faisant les bases et les critères d'un système plus élevé du savoir. [...] La théorie de la prise de forme par positivisation des incompatibilités de l'expérience devrait permettre de reprendre le problème du schématisme sur des bases nouvelles, et de donner peut-être un sens nouveau au relativisme, en même temps qu'elle fournirait une base pour l'interprétation de tous les processus psychiques de genèse et d'invention. ».

⁴⁷⁰ V. Beaubois, « Un schématisme pratique de l'imagination », art. cit.

⁴⁷¹ V. Beaubois, « Ethnographies du design », art. cit. Voir aussi : V. Beaubois, *La zone obscure du design : une pensée des pratiques de conception (d')après Gilbert Simondon*, Thèse de doctorat en philosophie, Université Paris Nanterre, 2019.

⁴⁷² E. Kohn, *Comment pensent les forêts: vers une anthropologie au-delà de l'humain*, Bruxelles, Zones Sensibles, 2017. Pour une analyse critique de l'ouvrage d'un point de vue peircien, voir : J.-M. Chevalier, « Animal, trop animal », *Cahiers philosophiques*, vol. 153, n° 2, 2018, p. 101-112.

⁴⁷³ H. Gens, *Jakob von Uexküll, explorateur des milieux vivants: logique de la signification*, Paris, Hermann, 2014.

⁴⁷⁴ C. Chauviré, *L'œil mathématique*, op. cit.

⁴⁷⁵ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit.

Cet agencement de la sémiotique peircienne et de la théorie simondienne de l'information⁴⁷⁶ permet deux choses selon nous : 1° retourner à la source du premier romantisme allemand ; 2° en expliciter l'intuition fondamentale, en la rendant opératoire. Cette idée, d'inspiration romantique⁴⁷⁷, c'est qu'il existe ce que Goethe nommait un « jugement par perception intuitive » (*anschauende Urteilskraft*). Or c'est précisément une idée qui était récusée par Kant, car elle signifie pour lui la possibilité d'un accès immédiat au suprasensible⁴⁷⁸. Mais si on relie cette idée goethéenne à la problématique du geste, donc de la pratique, alors on peut lui faire désigner une expérimentation idéale sous contrôle, donnant lieu à la captation et à la saisie de contenus intuitifs nouveaux engendrant une extension de la connaissance et de la preuve, donc de la raison⁴⁷⁹.

Cette pensée du geste enveloppant dans son actualité concept et intuition, on ne la trouve pas seulement chez Goethe, mais également chez des mathématiciens et philosophes des mathématiques : Jean Cavallès et Gilles Châtelet, deux penseurs du diagramme⁴⁸⁰. Il s'agit d'expérimenter à même une matière symbolique, en manipulant des signes dans les espaces combinatoire et opératoire d'une nature formelle, mais d'une nature tout de même. En effet le signe, dès lors qu'il est limité par la finitude du symbole graphique, est ce qui peut se donner immédiatement comme une médiation de la chose symbolisée. On peut donc en faire une véritable phénoménologie publique⁴⁸¹, que Peirce nommait d'ailleurs « phanérosopie ». La phanérosopie, c'est la description du *phanéron*, de n'importe quoi de présent à l'esprit, quelle que soit sa modalité⁴⁸². Dans

⁴⁷⁶ G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit.

⁴⁷⁷ G. Châtelet, « Géométrie et philosophie de la nature », art. cit.

⁴⁷⁸ E. Kant, *Les progrès de la métaphysique en Allemagne depuis le temps de Leibniz et de Wolf*, Paris, J. Vrin, 1990, p. 53.

⁴⁷⁹ B. Leclercq, « Iconic Virtues of Diagrams. Peirce on Ampliative Reasoning », *Signata. Annals of Semiotics*, n° 10, 2019.

⁴⁸⁰ P. Cassou-Noguès, *De l'expérience mathématique*, op. cit. Voir aussi : G. Châtelet, *Les enjeux du mobile: mathématique, physique, philosophie*, Paris, Seuil, 1993.

⁴⁸¹ B. Bachimont, « L'artéfacture entre herméneutique de l'objectivité et de l'intersubjectivité : un projet pour l'intelligence artificielle », art. cit. Voir aussi C. S. Peirce, *Écrits sur le signe*, Paris, Seuil, 1978.

⁴⁸² C. S. Peirce, *Écrits sur le signe*, op.cit., p. 67.

cette perspective, le signe est externalisé et rendu pérenne grâce à un support et à un substrat d'inscription, tous deux formatés à travers des techniques de manipulation qui permettent une transmission et une appropriation des contenus de connaissances⁴⁸³.

Si on code grâce à des icônes des gestes à opérer, c'est-à-dire des règles de manipulation à suivre, alors on peut accéder à une connaissance pratique de nature diagrammatique⁴⁸⁴. La phénoménologie de la connaissance qui en découle consiste dès lors à substituer à la phénoménologie des choses une phénoménologie des signes, à laquelle il faut adjoindre l'artisanat de leur manipulation, c'est-à-dire les techniques de manipulation graphiques qui réactivent la puissance opératoire des paradigmes dont les signes manipulés sont les symboles⁴⁸⁵.

Or ce qui nous intéresse en articulant Peirce et Simondon, ce n'est ni de faire une phénoménologie de l'esprit ni de faire une phénoménologie de la nature, mais une phénoménologie de la connaissance qui les médiatise toutes les deux. Le problème du schématisme peut se reposer au cœur de la matérialité symbolique, à l'articulation de l'esprit, du corps et de la nature, sur une fine membrane, qui est à la fois un support de projection de l'esprit et un support d'inscription de la nature. La notion de geste est alors capitale, car elle se situe à l'intersection du corps et de l'esprit et trouve le support de sa pérennité à travers la réalité d'un « ancrage matériel⁴⁸⁶ » .

La seconde porte d'entrée est le concept d'information, car c'est un point de contact pour faire dialoguer Peirce et Simondon, comme le confirme la thèse de Jérôme Vogel,

⁴⁸³ C'est pourquoi les Grecs appelaient *mathêmata* les connaissances dans leur contenu, mais aussi la manière dont ces contenus sont véhiculés à travers des formules qui doivent être apprises. Voir : M. Foucault, cours inédit du 23 février 1983, art. cit., p. 61.

⁴⁸⁴ F. Stjernfelt, « On Operational and Optimal Iconicity in Peirce's Diagrammatology », *Semiotica*, vol. 2011, n° 186, janvier 2011.

⁴⁸⁵ G. Simondon, « Recherche sur la philosophie de la nature », in N. Simondon et I. Saurin (éd.), *Sur la philosophie*, op. cit., p. 30-31.

⁴⁸⁶ E. Hutchins, « Material anchors for conceptual blends », art. cit.

qui porte sur le concept d'information chez Peirce⁴⁸⁷. Vogel dégage un concept d'information chez Peirce ayant une dimension à la fois quantitative (l'information, c'est la quantité de supplément de connaissance produite par les représentations et les raisonnements diagrammatiques) et qualitative (l'information, c'est la force de croissance immanente aux représentations diagrammatiques). En effet si les formes, c'est-à-dire les manières par lesquelles les signes connaissent leurs objets, excèdent la quantité nécessaire pour définir le déjà connu, alors elles apportent un supplément de connaissance. Tout l'intérêt de rapprocher Peirce et Simondon réside alors selon nous dans le fait que dans certaines conditions expérimentales, l'augmentation de la connaissance au sens de Peirce va procéder d'un phénomène d'amplification au sens de Simondon, c'est-à-dire d'une tension d'information ouverte à une prise de forme. Or une telle prise de forme est simultanément une opération d'individuation et de communication.

Nous nommons en effet « schématisme opératoire » la ligne de congruence entre l'opération de la Nature et l'opération de l'Esprit. Cette coopération, cet accord, nous pouvons les penser comme organisation d'une solution dans le temps de la finitude existentielle d'un être vivant et interprétant, sémiotiquement informé et mathématiquement outillé. On peut alors définir cet être vivant comme une *puissance interprétative*. Or ce schématisme de la morphogenèse a été entrevu selon nous par Simondon dans sa conférence sur « L'amplification dans les processus d'information »⁴⁸⁸, comme nous allons l'explicitier plus en détail.

⁴⁸⁷ J. Vogel, *Sémiotique de l'information chez Charles S. Peirce*, Thèse de doctorat en sémiologie, Université du Québec à Montréal, 2014. Pour un résumé de cette thèse voir : J.-M. Chevalier, « Design et sémiotique », art. cit.

⁴⁸⁸ G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit.

2.3 Schématisme diagrammatique de la morphogenèse

Simondon a proposé dans sa thèse principale⁴⁸⁹ une théorie générale des processus d'individuation qu'il a classés en trois grands types : l'individuation physique, l'individuation biologique et enfin l'individuation psychique et collective. L'individuation physique est celle que l'on peut par exemple voir à l'œuvre dans un processus de cristallisation. Le propre de l'individuation physique, c'est qu'elle n'a pas de devenir. Elle s'achève une fois qu'elle a eu lieu. Dans le cas de l'individuation physico-chimique, la singularité informative au principe de l'amplification de l'individu est un germe cristallin renfermant un certain nombre de tensions internes structurées. Le processus d'individuation physique qui engendre le cristal s'opère à partir du moment où le germe est introduit dans une solution en état de métastabilité, et s'il possède une structure de compatibilité avec l'espèce chimique qu'il rencontre. L'avènement progressif du cristal est alors produit grâce à la propagation de la structure du germe qui syncristallise avec l'espèce chimique de la solution. La propagation s'opère par modulation à la limite du couple structurant/structuré : l'élément structurant est le germe cristallin ; les éléments structurés, les molécules de la solution. C'est cette modulation opérée de proche en proche que Simondon nomme « transduction », terme qu'il reprend à la bactériologie, puisque le paradigme bactériologique de la transduction permet d'en extraire le schème opératoire. L'amplification transductive⁴⁹⁰ du cristal nous donne ainsi le premier modèle d'un schématisme de l'opération comme premier schème de subversion du schéma hylémorphique. Le cristal n'est pas la synthèse d'une matière et d'une forme, mais le produit terminal d'un schématisme opératoire consistant en une amplification dont la stabilisation produit un tout structuré qui est isomorphe à chacun de ses éléments constituants : c'est un modèle de société analogique. L'expérience du processus de

⁴⁸⁹ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit.

⁴⁹⁰ Ce type d'amplification peut s'opérer suivant le modèle de la ligne, de la surface ou du volume.

cristallisation nous donne ainsi le paradigme à partir duquel on peut extraire le schème opératoire de l'amplification transductive.

Après l'individuation physique, vient l'individuation vitale, dont le schème est celui de l'« amplification modulatrice ». L'amplification modulatrice permet en effet de penser des phénomènes fondamentaux de l'individuation vitale, en particulier l'autorégulation du milieu intérieur et l'actualisation des énergies potentielles emmagasinées dans l'organisme à travers des opérations vitales qui effectuent un travail. On peut obtenir une représentation simple du schème de l'amplification modulatrice à partir de l'analyse du dispositif triode, qui est un modulateur technologique assez simple. En tant qu'objet technique, le modulateur triode résulte d'une série d'inventions, qui permettent de l'instituer comme paradigme de l'amplification modulatrice. L'essence de la triode est d'être un dispositif électrotechnique de conduction asymétrique. Grâce à la grille de commande, il devient possible d'informer l'énergie émise par la cathode, et donc de contrôler son actualisation dans une sortie effectrice, grâce à une énergie faible ayant un rôle de support d'information modulatrice. La triode fournit donc le *paradigme* technologique à partir duquel on peut extraire le *schème opératoire* de l'amplification modulatrice. Ce schème, en vertu du principe d'équivalence fonctionnelle peut être retrouvé dans des structures naturelles : l'organisme vivant est en effet un modulateur complexe car il est un système à plusieurs entrées d'énergie et d'information, capable d'emmagasiner et de contrôler l'actualisation d'une énergie potentielle dans ses sorties effectrices. Par conséquent, l'amplification modulatrice se présente comme une amplification transductive contrôlée, soit comme un type d'amplification où il y a un contrôle permanent de l'incidence d'information, ce qui permet un gouvernement de l'actualisation de l'énergie potentielle d'alimentation sous forme de travail dans les sorties effectrices de l'organisme vivant. Ce travail peut devenir une action organisée, lorsque l'individu n'est plus seulement un être vivant, mais un individu psychique. Or une action organisée est régie par un troisième type d'amplification : l'« amplification organisante »,

qu'on trouve à l'œuvre dans les processus de développement, d'apprentissage, d'invention et d'action collective.

Les processus d'amplification organisante se présentent comme des séries de résolutions de problèmes vitaux, dont la trame constitue comme l'écrit Simondon « un tissage progressif de comportements⁴⁹¹ ». Or le paradigme à partir duquel Simondon extrait le schème opératoire de l'amplification organisante pour penser le développement et l'intégration des fonctions vitales supérieures, c'est-à-dire le passage de la perception à l'action, puis de l'action à l'action organisée, c'est le paradigme de la *disparation*, qu'il trouve dans la théorie psycho-physiologique de la perception visuelle⁴⁹². Dans le cadre de la vision, la disparation correspond au fait que les images rétiniennes projetées sur chaque œil correspondent à deux ensembles d'informations incompatibles. La perception de la profondeur suppose la conservation de l'information issue de chaque image rétinienne, grâce à l'intégration de leurs différences sur fond de points communs, ce qui produit le relief comme signification de l'objet perçu en trois dimensions⁴⁹³. Autrement dit, en généralisant le schème de la vision binoculaire à tous les phénomènes perceptifs, on peut appeler perception la résolution d'un problème opérée grâce à l'invention d'une forme significative qui étend les limites de l'individu psychique, c'est-à-dire son monde, comme la carte étend notre connaissance du territoire⁴⁹⁴.

Alain Berthoz a nommé « *simplexité*⁴⁹⁵ » cette stratégie économique de résolution de problème effectuée par les êtres vivants au cours de leur évolution. Elle consiste à mettre en œuvre des méthodes de simplification non simplistes face à la complexité du réel, pour résoudre les problèmes complexes avec rapidité et élégance grâce à l'organisation de

⁴⁹¹ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 205.

⁴⁹² G. Simondon, « L'amplification dans les processus d'information », in J.-H. Château & N. Simondon (éd.), *Communication et information*, op. cit., p. 170.

⁴⁹³ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 222 : « Le relief intervient comme signification de cette dualité des images ; la dualité des images n'est ni sentie ni perçue ; seul le relief est perçu. »

⁴⁹⁴ M. G. Dondero, « Diagramme et parcours visuels de la démonstration », art. cit.

⁴⁹⁵ A. Berthoz, *La simplexité*, op. cit.

systèmes intégrés⁴⁹⁶. Or l'amplification organisante devient *constructive* lorsqu'elle sort de l'organisme pour donner lieu à des inventions techniques qui viennent instrumenter la résolution des problèmes. Ce qui nous conduit à l'individuation psychique et collective, dans la mesure où ce type d'individuation apparaît avec la technicisation du vivant. L'individuation psycho-collective produisant ce que Simondon appelle le « transindividuel », c'est-à-dire la fonction symbolique.

2.4 Ontologie, sémio-technique et morphogenèse

Les diagrammes, dès lors qu'ils sont conçus comme des dispositifs sémio-techniques, c'est-à-dire dès qu'ils sont matérialisés dans des supports d'instrumentation du savoir tels que des documents techniques, acquièrent un mode d'existence symbolique qui rend possible l'expérimentation et l'interprétation d'une finitude matérielle qui excède le périmètre du calculable (tracé par Turing) et commande la genèse des formes supra-calculatoires (morphogenèse).

L'enjeu est de montrer que le diagramme possède une effectivité symbolique irréductible à la calculabilité mais saisissable par une conscience. Nous nommons ainsi herméneutique opératoire l'activité interprétative d'une conscience qui se saisit d'un diagramme comme d'un outil à travers un geste qui en actualise le sens à travers une pratique. La diagrammatologie est donc un programme qui articule une ontologie, une phénoménologie de la connaissance et une philosophie de l'interprétation pour produire une philosophie de l'action.

Pour le mettre en œuvre, nous pensons qu'il faut articuler une théorie générale des signes (la sémiotique de Peirce), une théorie générale de l'être (l'ontologie de Simondon)

⁴⁹⁶ Un analogue de la simplicité nous est donné dans le processus de compactification de l'écriture symbolique grâce auquel et par lequel, entre Einstein et nous par exemple, les équations de Maxwell pour l'électromagnétisme sont passées de plusieurs dizaines de symboles à seulement quelques-uns. Voir : C. Alunni, « De l'écriture de la mutation à la mutation de l'écriture: de Galileo Galilei et Leonardo da Vinci au "technogramme" », in F. Nicolas (dir.), *Les mutations de l'écriture*, art. cit.

et une théorie matérielle de la connaissance (la théorie du support de Bachimont). L'agencement de ces trois dispositifs théoriques doit permettre de produire une épistémologie de l'action dont on peut dire qu'elle est à la fois une théorie et une pratique de la lecture qu'on pourrait résumer dans une formule détournant Austin : « Quand lire, c'est faire ».

Dans un premier temps, nous présentons brièvement les concepts fondamentaux de la pensée de Peirce pour montrer en quoi l'un d'entre eux, le concept de diagramme, est un concept opératoire qu'on peut faire fonctionner au cœur du dispositif ontologique simondonien, qui est le cadre métaphysique actuel qui permet de réinitialiser le programme d'une philosophie de la nature. En effet si on articule la fonction opératoire de cette catégorie sémiotique à l'effectivité de ce que donne à penser l'héritage de la pensée ontologique simondonienne, on peut exprimer cette effectivité dans les termes de la sémiotique de Peirce, pour la mettre en œuvre pratiquement, à partir de la théorie du support élaborée par B. Bachimont, à travers un schématisme pratique dont a commencé à rendre compte V. Beaubois dans un article récent⁴⁹⁷. Mettre en œuvre le schématisme pratique de l'imagination telle que cette imagination est prise dans un processus à la fois de conception, d'actualisation et de concrétisation, c'est opérer l'actualisation analogique continuée des schémas dont est porteur un certain type de document technique, le document technique procédural, même si ce n'est pas le seul. Car le document technique procédural est un exemple de médiation sémio-technique qui rend possible l'actualisation analogique des schèmes opératoires matérialisés dans les schémas techniques, et cela, dans une lecture diagrammatique qui est un faire, c'est-à-dire une pratique productive.

2.4.1 Ontologie et sémiotique chez Peirce

Notre propos n'est pas de faire une exégèse de la pensée de Peirce, mais de présenter l'articulation systématique des concepts fondamentaux qui structurent son ontologie et

⁴⁹⁷ V. Beaubois, « Un schématisme pratique de l'imagination », art. cit.

sa sémiotique pour en isoler un, le concept de diagramme. Nous isolons ce concept pour opérer la réduction sémiotique de l'ontologie simondonienne. À cela deux raisons selon nous : 1° le concept de diagramme est un concept à caractère analogique ; 2° il est pourvu d'un critère d'opérationnalité. Il a donc deux propriétés qui justifient son rapprochement et sa confrontation à la pensée ontologique simondonienne, qui est foncièrement analogique et opératoire.

Peirce propose une ontologie qui est extrêmement simple, puisqu'elle se réduit à trois catégories : priméité, secondéité et tercéité. Pour Peirce, ces catégories désignent les trois modalités d'expression de l'être :

- la priméité désigne la possibilité qualitative positive. Par exemple, la rougeité est l'être en soi du rouge. C'est ce qu'on appellerait dans le vocabulaire de la métaphysique contemporaine une propriété dispositionnelle.
- La secondéité désigne l'événement qui arrive ici et maintenant et s'actualise comme un fait. C'est par exemple le bouquet de rose qu'un amant offre à sa compagne pour lui exprimer son amour sincère. La secondéité se caractérise par sa matérialité et sa résistance. En effet si nous ne faisons pas vraiment attention en nous approchant d'un rosier, nous prenons le risque de nous faire piquer par ses épines. Cette piqûre s'exprimera par une réaction immédiate de rejet, car se piquer contre un rosier, cela fait mal, donc cela fait réagir.
- La tercéité enfin, qui désigne la catégorie de la virtualité. La tercéité articule la potentialité à l'actualité, c'est-à-dire la priméité à la secondéité. Traduites dans les termes de la métaphysique contemporaine, priméité, secondéité et tercéité renvoient donc à la potentialité, à l'actualité et à la virtualité.

Dit autrement, la priméité est la catégorie du sentiment, la secondéité la catégorie de l'expérience, la tercéité la catégorie de la loi.

Cette ontologie, Peirce l'exprime à travers une théorie générale des signes qu'il appelle sémiotique. Au sein de cette théorie du langage, il distingue trois grandes catégories de signes :

- les indices, signes qui entretiennent un rapport de contiguïté spatiale et de causalité avec l'objet dont ils sont les signes. Par exemple, la trace de pas dans la boue est l'indice du chasseur ; la girouette, l'indice de la direction et du sens du vent.

- Les icônes sont les signes qui entretiennent un rapport de ressemblance avec leur objet.

Au sein de la catégorie des icônes, Peirce distingue deux sous-catégories : les images et les diagrammes. L'image entretient un rapport de similitude figurative avec l'objet dont elle est la représentation, tandis que le diagramme expose une analogie de relations entre ses parties et les parties de l'objet qu'il représente (ou même entre ses parties et les parties des objets qu'il met en relation de comparaison). C'est pourquoi Peirce définit le diagramme comme une « icône de relations intelligibles ». Toute représentation dont les parties composantes entretiennent des relations analogues aux parties de l'objet dont elles sont la représentation est un diagramme. C'est pourquoi Peirce affirme par exemple qu'une équation algébrique est un diagramme, car les signes algébriques de l'équation rendent perceptibles les relations entre les quantités visées.

- Les symboles, signes qui entretiennent un rapport de convention à ce dont ils sont les symboles. C'est par exemple la balance comme symbole de la justice.

Tout signe, dès lors qu'il est pensé de manière vivante (et non abstraite) est inscrit dans un processus que Peirce nomme *semiosis* (qu'on traduit en français par sémiose). Ce processus implique toujours la triade signe-objet-interprétant. Par exemple, le mot chien est un signe qui renvoie à un animal (objet) en vertu d'une définition selon laquelle un chien est un mammifère carnivore de la famille des Canidés (interprétant). Dans cet exemple, le mot chien est le signe, le mammifère carnivore est l'objet, la définition proposée est l'interprétant.

Les éléments qui constituent la base de l'ontologie et de la sémiotique de Peirce sont donc :

- trois catégories ontologiques (priméité, secondéité, tercéité) ;
- trois catégories de signes (indices, icônes, symboles) ;
- trois pôles sémiotiques (signe, objet, interprétant).

Dans cette boîte à outils, seul le concept de diagramme nous intéresse, parce que lui seul permet d'articuler ontologie et théorie de la connaissance, objet de connaissance et sujet connaissant, via une médiation ayant un caractère analogique. En quoi le diagramme au sens de Peirce peut-il se révéler être un outil de présentification de l'ontologie simondonienne, et même plus, un instrument de réduction ? Selon nous, c'est parce qu'il est pourvu d'un critère d'opérationnalité et qu'en vertu de ce critère, il est l'instrument sémiotique idoine qui doit permettre de capturer cet aspect subtil de l'être que Simondon appelle son opération, qui est l'essence dynamique de l'agir au cœur de l'être.

2.4.2 Diagrammatiser l'opération technique

Peirce et Simondon sont deux philosophes qui ont articulé à leur façon ontologie et logique via la médiation d'une procédure analogique. Pour chacun d'entre eux, le niveau logique est une *modélisation* du niveau ontologique. Cela veut dire que le niveau ontologique excède toujours le niveau logique. Le niveau logique exprime systématiquement une réduction dont le sens tire son origine d'une volonté de la part du sujet connaissant et agissant de maîtriser et de mettre en ordre le monde qui l'entoure⁴⁹⁸.

Modéliser, c'est réduire pour comprendre et c'est comprendre pour agir. Tel est le sens du rapport de la pensée diagrammatique à la pensée pragmatique chez Peirce. En effet chez Peirce, le diagramme modélise les relations entre les parties de son objet et

⁴⁹⁸ « Selon le Prométhée d'Eschyle, c'est bien la *tekhnè* qui constitue cet "instrument de différenciation" (selon la formule de Hippase de Métaponte) qui défriche, débrouille, démêle et détaille le chaos premier pour l'ordonner en monde. » (J. Vioulac, *L'époque de la technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2009, p. 93)

permet grâce à sa manipulation la découverte de nouvelles propriétés sur l'objet dont il est la modélisation. Autrement dit, il rend possible une expérimentation idéale. Pour Peirce, le paradigme de la pensée diagrammatique est la pensée mathématique et le paradigme de la pensée mathématique est la géométrie élémentaire telle que ses démonstrations passent par des opérations de transformations des structures géométriques qu'elle étudie et codifie, dans un alphabet et un répertoire de symboles finis.

En codant algébriquement les termes d'un problème de géométrie comme par exemple celui d'*Éléments* II, 11, nous avons montré qu'il était possible de vérifier la pertinence de la définition peircienne du diagramme comme « icône de relations intelligibles », « véridiquement iconique » et « naturellement analogue » (Peirce) à la chose qu'il représente (les données d'un problème dans cet exemple). Cet exemple nous a aussi permis de vérifier la pertinence de la définition simondonienne de la déduction comme « mode contrôlé de transduction sur des symboles ». Le modèle paradigmatique de la transduction contrôlée telle qu'on peut la figurer à travers un diagramme élémentaire serait l'équivalence suivante, qui est le support de l'opération de comparaison mise en œuvre par un esprit qui opère le jugement synthétique le plus élémentaire :

$$\text{Si } A = B \text{ et si } B = C \text{ alors } A = C$$

Cet exemple élémentaire permet de comprendre pourquoi modéliser diagrammatiquement c'est réduire pour comprendre et comprendre pour agir. Dans ce cas, l'action opérée est ce que Simondon appelle un « acte analogique », c'est-à-dire la saisie d'une relation d'équivalence entre des objets par la médiation des opérations de la pensée. Lorsque ces objets ne sont pas des idéalités mathématiques mais les objets des sciences empiriques, l'étude des opérations de transformations équivalentes fonde ce que Simondon nomme la « technologie réflexive » ou science des actes analogiques opérés dans les diverses sciences objectives spécialisées.

L'acte d'instauration d'une pensée philosophique authentique est pour Simondon foncièrement analogique dans la mesure où l'opération véritablement logique capture dans la syntaxe de sa sémiotique le sens du dynamisme de son objet, de ce dont elle parle de manière réflexive.

Emmanuel Sander et Douglas Hofstadter ont récemment affirmé que l'analogie est le « cœur de la pensée⁴⁹⁹ », thèse à laquelle nous souscrivons, parce que cette énigme de l'analogie hante la philosophie, c'est-à-dire l'ontologie, depuis sa naissance même, dans les œuvres de Platon et d'Aristote. Cette énigme, c'est celle de l'*universalité non générique de l'être*, déjà reconnue par Aristote comme unité d'analogie, comme le rappelait Heidegger au tout début d'*Être et temps*, mais qui abandonna le problème après l'avoir identifié comme ses prédécesseurs grecs⁵⁰⁰. On comprend ainsi pourquoi Heidegger a reconnu que sa lecture de la célèbre dissertation de Brentano⁵⁰¹ sur les diverses acceptions de l'être chez Aristote fut déterminante dans l'orientation de son enquête. On comprend aussi pourquoi il rédigea sa thèse d'habilitation sur le dispositif catégorial de la pensée scotiste⁵⁰². Car au cœur des écrits du Docteur subtil, comme dans tout le courant du Moyen Âge et jusqu'au 17^e siècle compris, gît le problème de la signification de l'être⁵⁰³, qu'on peut formuler en ces termes : l'être est-il univoque, équivoque ou analogue ? Derrière cette question, se cache le problème, « très délicat » comme l'écrivait Deleuze, du commencement en philosophie⁵⁰⁴.

⁴⁹⁹ E. Sander & D. Hofstadter, *L'analogie : cœur de la pensée*, Paris, Odile Jacob, 2013. Des analogies sans concepts sont fallacieuses, des concepts sans engagements dans des circuits analogiques sont inopérants : telle pourrait s'énoncer – en détournant la célèbre formule de Kant – la thèse au cœur de cet ouvrage. Pour les auteurs, le moteur de la circulation analogique des concepts est la catégorisation, qui permet d'appréhender l'inconnu à partir du connu. Elle constitue ainsi un instrument heuristique d'appréhension d'expériences inédites et d'intégration d'informations supplémentaires qui enrichissent nos connaissances au cours de nos apprentissages, qui empruntent des circuits analogiques entre des horizons subjectifs et objectifs.

⁵⁰⁰ M. Heidegger, *Être et temps*, éd. E. Martineau, Introduction, chapitre 1, §1, p. 25.

⁵⁰¹ F. Brentano, *Aristote : les diverses acceptions de l'être* (1862), Paris, J. Vrin, 2005.

⁵⁰² M. Heidegger, *Traité des catégories et de la signification chez Duns Scot* (1915), Paris, Gallimard, 1970.

⁵⁰³ D. Scot, *Sur la connaissance de Dieu et l'univocité de l'étant*, O. Boulnois (trad.), Paris, Presses universitaires de France, 1988.

⁵⁰⁴ G. Deleuze, *Différence et répétition*, op. cit., p. 169.

Toute la portée de l'ontologie simondonienne se mesure selon nous à l'examen de quelques textes de jeunesse, des manuscrits préparatoires à sa thèse, dans lesquels Simondon parle de la réduction logiciste qu'opère toute philosophie au moment de son instauration : « Une philosophie peut ce que peuvent ses paradigmes, sa relation primitive et analytique à l'être ⁵⁰⁵ ». Cette réduction logiciste, pour être productive et non sophistique, exige d'exprimer l'agir qui opère au cœur de l'être analysé. On sait maintenant comment Simondon a réussi à radicaliser la méthode intuitive bergsonienne en ancrant sa réflexion dans les deux paradigmes fondamentaux⁵⁰⁶ que sont la chimie physique (plus exactement la technique cristallographique de l'épitaxie) et la théorie de l'information (telle qu'elle opère à l'intérieur d'un dispositif technique de modulation et de démodulation pour la transmission d'un message).

Simondon et Peirce permettent de redéfinir les mathématiques comme la science des relations médiatisées par des représentations diagrammatiques, c'est-à-dire comme une science de la forme inséparable d'une technologie graphique et d'une pratique sémiotique. La réflexion sur l'écriture diagrammatique permet de comprendre comment les mathématiques, une fois qu'elles sont redéfinies comme une pratique sémiotique effectuée sur des diagrammes, peuvent être clairement conçues comme la technologie graphique grâce à laquelle on parvient à interpréter humainement la nature comme étant écrite en langage mathématique. La production théorématique telle que décrite par Peirce⁵⁰⁷ se révèle être l'analogue du processus de concrétisation techno-génétique décrit par Simondon⁵⁰⁸ : c'est une résolution de problème qui produit une genèse de la forme et une extension de la connaissance. La production théorématique, comme morphogenèse, a pour corrélat un processus de simplification notationnelle qui se révèle être l'analogue du processus de réduction intégrative de la complexité telle qu'elle a lieu dans l'évolution

⁵⁰⁵ G. Simondon, *Sur la philosophie*, op. cit., p. 31.

⁵⁰⁶ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 536.

⁵⁰⁷ M. G. Dondero, « Diagramme et parcours visuels de la démonstration », art. cit.

⁵⁰⁸ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, op. cit., ch. 1.

des êtres vivants. Dans les deux cas, production théorématique et morphogenèse vivante, l'intuition diagrammatique est le souffle de vie de l'activité créatrice, à la fois stratégique et économique.

On pourrait résumer le schématisme de la morphogenèse dans cette célèbre formule attribuée à César : *veni, vidi, vici*⁵⁰⁹. Elle est un diagramme au sens de Peirce : celui du temps de l'action humaine où la coordination de processus transductif et modulateur est dirigée par un *coup d'œil*, une *anchinoia* (ἀγχίνοια), qui contrôle une action organisée. Cette formule, c'est à la fois le diagramme et le symbole de la triade simondonienne transduction-modulation-organisation. Son cœur, c'est l'intuition diagrammatique conçue à la façon du coup d'œil du stratège⁵¹⁰, qui rend possible la victoire sur le champ de bataille, c'est-à-dire sur le théâtre des opérations.

3. Histoire de la science, connaissance analogique, philosophie de la nature et ingénierie sémiotique

3.1 Théorie, expérimentation, simulation, analyse de données et lecture opérationnelle

La science moderne, celle qui prend sa source chez Galilée, Kepler, Newton, Descartes, repose sur deux piliers : la théorie et l'expérimentation. La science contemporaine, qui est née dans l'immédiat après-guerre grâce aux travaux de Turing avec l'invention de l'informatique, a vu s'élever un troisième pilier, la simulation, grâce à la puissance de calcul automatique que nous procurent les processeurs : de cette façon, on a pu commencer à déduire les résultats d'une action sans l'effectuer dans le monde réel, donc sans avoir recours à l'expérimentation. La science actuelle, dans le contexte de la numérisation intégrale de tous les contenus (qu'ils soient scientifiques, culturels ou sociaux), couplée à la puissance titanesque des moyens du calcul haute performance, a vu s'élever un quatrième pilier : l'analyse de données. L'analyse de données est à

⁵⁰⁹ G. Simondon, *Communication et information*, op. cit., p. 74.

⁵¹⁰ E. L. Wheeler, *Stratagem and the Vocabulary of Military Trickery*, Leyden-New York, Brill, 1988.

l'origine de ce que Bachimont a nommé la deuxième révolution nominaliste, celle où le calcul et la donnée se sont substitués au langage comme moyens d'accès à la culture⁵¹¹.

Depuis presque vingt ans, on parle d'*eScience* et de *Big data* pour faire référence à un nouveau paradigme, celui des sciences des données, dont une chaire permanente a été inaugurée au Collège de France le 11 janvier 2018⁵¹². Depuis un peu plus de dix ans, on parle de *cultural analytics*⁵¹³ pour désigner les efforts de mise en forme des données de masse, où trois étapes structurent le travail : la collecte des données, l'analyse statistique et la visualisation des résultats.

La science repose donc actuellement sur quatre assises : la théorie mathématique, l'expérimentation physique, la simulation informatique et l'analyse de données numériques.

Dans cette seconde révolution nominaliste, les données et le calcul ne sont donc plus seulement les moyens d'accès à la nature comme objet de science, mais deviennent les moyens d'accès à la culture. Cette culture est une techno-culture médiatisée par le calcul qui est le nouveau support de la connaissance. C'est pourquoi Bachimont, dans le sillage des travaux de Goody, a avancé l'idée que notre rationalité devrait être reconfigurée par le calcul et le numérique, d'où son exploration d'une « raison computationnelle » (Bachimont), fille de la raison graphique de Goody.

Dans ce contexte, ce n'est pas seulement la distinction entre nature et culture qui est bouleversée, c'est aussi la distinction entre monde et nature, et par voie de conséquence, celle entre le phénoménologique et le scientifique. Nous sommes peut-être au seuil d'un nouvel âge de la science, car après :

⁵¹¹ La première révolution nominaliste remonte au 16^e siècle : elle correspond à la coupure ontologique établie entre la langue et la nature par l'institution de la mathématisation comme légalisation formelle de la structure ontologique du monde. Voir : B. Bachimont, « Le nominalisme et la culture », in B. Stiegler (dir.), *Digital studies : organologie des savoirs et technologies de la connaissance*, Limoges, Fyp, 2014.

⁵¹² S. Mallat, *Sciences des données et apprentissage en grande dimension*, Paris, Fayard/Collège de France, 2018.

⁵¹³ L. Manovich, « Cultural Analytics: Vizualizing Cultural Patters in the Era of More Media », Milan, *Domus*, 2009.

- l'âge de la science phénoménologique ouvert par Aristote, fondé sur l'observation perceptive et la catégorisation linguistique ;
- l'âge de la science causale ouvert par Descartes et Galilée, fondé sur la mesure des phénomènes et la légalisation mathématique des lois de la nature ;
- et enfin l'âge de la science simulatrice ouvert par Turing, fondé sur la codification numérique et la simulation informatique ;
- nous sommes peut-être arrivés au seuil de l'âge de la connaissance analogique, qui serait à même de défier le partage post-galiléen entre science et philosophie, grâce au développement d'un programme de recherche articulant les sciences de la nature aux sciences de la culture, à travers le projet d'une ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques fondée sur un usage méthodique de l'analogie.

Selon nous, ce programme de recherche est celui qui se donne pour finalité de saisir la portée technologique de l'analogie en couplant :

- la portée ontologique de l'analogie telle qu'elle a été saisie par Simondon dans son œuvre ;
- la portée sémiotique de l'analogie telle qu'elle a été saisie pour la première fois par Peirce dans l'élaboration d'une science des signes.

Notre objectif est de motiver le programme d'une telle ingénierie sémiotique en tant qu'elle est à la fois un projet de compréhension théorique de l'analogie et un projet de mise en œuvre pratique de la méthode analogique.

Nous soutenons que le diagramme est une machine sémiotique qui permet d'opérer des inférences pratiques que nous appelons des pas opératoires, qui sont des pas productifs et parfois même créateurs, dans la mesure où ils possèdent un double ancrage matériel : matériel du côté du support physique d'inscription technique qui sémiotise des opérations concrètes ; matériel du côté du support organique de la vie interprétante qui énonce ces opérations concrètes dont le fonctionnement est capturé par des systèmes de signes. D'une certaine manière, nous pouvons dire que les diagrammes donnent accès à la

connaissance du troisième genre, parce que l'intuition diagrammatique est un co-fonctionnement analogique entre un système sémiotique et un système vivant qui l'interprète. En l'interprétant, le sujet vivant opère un parcours sémiotique qui s'enracine dans le monde, traverse sa pensée et révèle la puissance productive du couplage analogique entre la nature et l'esprit qui s'opère dans la pensée vivante qui invente.

L'ingénierie sémiotique est un programme d'intelligence artificielle qui poursuit le programme de l'herméneutique matérielle car :

- son objet est l'ensemble des opérations constitutives de la connaissance pratique ;
- elle s'intéresse à la classe des problèmes qui ne possèdent pas de solution algorithmique ;
- elle vise à instrumenter la résolution de problèmes non calculables en mobilisant les diagrammes comme des outils sémiotiques de résolution.

Outre les connaissances phénoménologiques de sens commun, cette discipline s'intéresse aux objets symboliques, dont la fonction est de pouvoir donner accès à la structure qualitative du monde à laquelle nous avons accès au moyen de la faculté nommée intuition. Ainsi le problème de l'intelligence artificielle symbolique conçue comme ingénierie sémiotique est le suivant : quelle doit donc être la structure d'un format technique de représentation graphique pour que celui-ci puisse enregistrer des opérations humaines dans des schémas permettant de donner accès à des contenus exacts irréductibles à la donation de sens telle qu'elle s'effectue dans l'interprétation d'énoncés linguistiques et qu'on ne peut pas coder numériquement ? Comment ces contenus peuvent-ils être rendus facilement accessibles dans un acte de lecture non littéral et non computable parce que non linguistique et non discrétisable numériquement ? Comment peut-on donner accès à un contenu opératoire pourvu d'un sens qui est irréductible au sens idéal véhiculé par les énoncés linguistiques et à une effectivité calculable qu'on pourrait coder numériquement ?

Cela est possible en faisant du diagramme un format de codage sémiotique qu'on va contraindre à faire parler silencieusement, car un diagramme ne parle pas de lui-même. Pour le faire parler, il faut le munir d'un ensemble de conventions interprétatives qui vont permettre de lui donner une sémantique opératoire permettant de nous guider vers l'effectivité matérielle qu'il donne à penser, à savoir celle des opérations non calculables qu'il donne à lire. Cette sémantique, c'est l'ensemble des conventions interprétatives qui permet de transformer des opérations de lecture en pas opératoires d'un faire qui fait sens car dirigé vers la reproduction d'une effectivité opérationnelle qui ne correspond ni à une idéalité codée linguistiquement ni à une grandeur mesurable qu'on peut symboliser mathématiquement.

La réalisation de ce programme de recherche passe ainsi par la mise en œuvre de deux principes : premièrement un principe de modélisation que nous appelons principe de diagrammatisation⁵¹⁴, car diagrammatiser, ce n'est pas formaliser. Diagrammatiser, c'est donner d'emblée une forme sémiotique à un contenu porteur de sens sans passer par la médiation du son. Ce n'est pas formaliser une connaissance après l'avoir codée linguistiquement. Deuxièmement on doit coupler à ce principe de modélisation un principe d'effectivité non calculatoire que nous nommons principe d'opérationnalité. Qu'est-ce qu'une effectivité opérationnelle mais non computationnelle ? C'est l'opérationnalité telle qu'elle s'actualise dans la lecture et l'interprétation d'un diagramme. La mise en œuvre du principe d'opérationnalité suppose alors d'avoir défini au préalable une sémiotique opérationnelle permettant d'orienter l'interprétation du diagramme vers le dynamisme auquel il renvoie de manière orthopratique.

Le contenu interprétable qu'est l'opérationnalité au cœur de tout diagramme ne peut dès lors être saisi que dans une tension entre la matière physique qui donne à penser et la matière organique dans laquelle s'enracine la conscience qui s'efforce de penser un tel

⁵¹⁴ La mise en œuvre de ce principe implique une schématisation, car un système de schémas ordonnés est une machine graphique à l'arrêt dont la mise en marche produit une diagrammatisation, c'est-à-dire le co-fonctionnement du dispositif de lecture et de l'agent cognitif qui s'en empare.

contenu. Entre les deux matières, il y a le format de manipulation technique qui doit capturer le contenu provenant de la matière et rendre accessible ce contenu à un interprétant. Le formatage du contenu, pour rendre congruents l'esprit qui interprète pour agir et l'opération capturée, doit respecter un rapport d'analogie car c'est ce rapport d'analogie qui permet la reproduction effective de l'opération visée à travers le diagramme. En diagrammatisant un contenu, on rend possible la visibilité et la lisibilité d'un contenu qui n'est pas théorique, mais pratique, au sens où ce contenu renvoie à une technicité irréductible, à un geste dynamique. Toute la difficulté de l'ingénierie sémiotique consiste alors à réussir à capturer le sens d'un dynamisme matériel à travers un signe non linguistique qui perd le caractère dynamique de la matière qu'il saisit. La modélisation diagrammatique consiste ainsi à rejouer le dynamisme de la matière dans la dynamique des signes afin d'informer et d'instruire le sujet interprétant qui s'en empare du sens de la pensée pratique. C'est pourquoi la diagrammatique est une écriture qui n'est ni alphabétique, ni numérique, mais symbolique et orthopratique, c'est-à-dire analogique au sens de l'iconicité opérationnelle.

3.2 Pratique, imagination et forme

Trois grands thèmes étaient au centre de notre questionnement : celui de la *pratique*, celui de l'*imagination* et celui de la *forme*. Ils représentent les trois segments de la chaîne de production dont la pratique est l'ancrage matériel, dont le diagramme est le support de modélisation, et dont la forme concrète est le produit manufacturé dans une action contrôlée. Le thème de la pratique, c'est celui du « souci » au sens de la tradition phénoménologique d'inspiration heideggerienne. Mais c'est aussi celui de la ruse au sens des Grecs (Μῆτις) et du « bon sens » au sens cartésien de l'expression. C'est celui du déploiement de l'instinct d'une « vie opérante » (Husserl) prise dans les nécessités matérielles de la vie, toujours tendue dans un effort d'attention, visant à thématiser sous forme de règles de méthode communicables les procédures de résolution des problèmes

rencontrés dans le quotidien. Ces procédures finies non mécaniques, nous les nommons *opérations*. Elles correspondent aux unités d'espace-temps de la pratique, c'est-à-dire aux gestes cadencés par les rythmes et les calendriers d'un temps social. La vie opérante est celle qui, socialisée mais guidée par l'instinct, met en œuvre une intelligence pratique, dont le diagramme est l'outil facilitateur.

Dans ce dispositif théorique et pratique, nous concevons l'imagination comme une machine transformant les données de l'expérience pratique en matières bien informées, c'est-à-dire en contenus de connaissances partageables. L'imagination connectée au moteur de la pratique, c'est la machine de production de la connaissance phénoménologique, médiatisée par cette machine sémiotique qu'est un diagramme. Elle est située entre la perception des contenus de l'expérience pratique et l'action engagée dans un environnement psychologique, sociologique et technologique qu'elle médiatise à travers la construction de diagrammes.

3.3 Iconicité, orthopraticité et isodynamisme

Le problème de la diagrammatologie, entendue comme phénoménologie de la connaissance pratique est le suivant : comment faire en sorte que la conscience ne soit pas simplement « conscience *de* quelque chose » mais conscience *de faire* quelque chose ? Selon nous, le diagramme est cette médiation dont la fonction est d'augmenter la conscience pour en faire une conscience sachant faire, c'est-à-dire une conscience pratique. Il est la médiation adéquate pour penser et opérer le passage de la théorie à la pratique. C'est un émulateur de faire : il rend possible la transformation de l'intentionnalité en lui faisant effectuer des sauts quantiques dans la conscience pratique. Autrement dit, c'est une matrice générative qui produit l'augmentation de la conscience qui s'en saisit.

Mais un diagramme ne parle pas de lui-même. Pour le faire parler, il faut le munir d'un ensemble de conventions interprétatives qui vont permettre de lui donner une sémantique opératoire. Cette sémantique, c'est l'ensemble des conventions interprétatives

qui vont permettre de transformer des opérations de lecture en pas opératoires qui sont les opérations d'un faire qui fait sens. Le faire sens du diagramme permet ainsi de dégager le noème d'un nouveau régime d'enregistrement, postérieur aux régimes d'enregistrement orthographique, analogique et numérique.

Nous nommons en effet caractère orthopratique du diagramme le sens des opérations non calculatoires auxquelles il donne accès à travers sa propriété d'iconicité opérationnelle. Qualifier cette iconicité d'opérationnelle, c'est insister sur le fait qu'elle ne se réduit ni à un isomorphisme structurel (schéma) ni à un isomorphisme formel (algorithme). L'intuition du contenu dont est porteur un diagramme permet ainsi d'explicitier l'idée de finitude non calculable porteuse de sens et saisissable par une conscience. Elle permet en outre de mettre au jour l'idée de « procédure finie non mécanique⁵¹⁵ » qui avait été avancée par Gödel.

À la fois trace et rétention d'un premier geste qu'il ne fait pas apparaître mais qu'il évoque comme un spectre, le diagramme est aussi la *protention* et la *projection* vers un autre geste qu'il suggère mais qu'il ne détermine pas (c'est pourquoi Châtelet parlait de « stratagème allusif⁵¹⁶ » au sujet du diagramme). On peut définir le *spectre* comme une apparition qui est le signe d'une disparition. Le diagramme est ainsi un phénoménogramme qui spectralise le geste qu'il exprime en le présentifiant sous forme de schéma. Ce geste, c'est aussi le « sourire de l'être » dont parlait Châtelet⁵¹⁷, mais aussi le sens de la proposition qui exprime l'événement⁵¹⁸, et dont la thématization conduit à l'abréviation par la détermination d'un symbole inscrit dans un espace combinatoire de manipulation, comme on le sait depuis le développement de la notation symbolique initié par les algébristes de la Renaissance. Dans ce dispositif, l'imagination correspond à la

⁵¹⁵ P. Cassou-Noguès, « Gödel et la thèse de Turing », *Revue d'histoire des mathématiques*, vol. 14, n° 1, 2008, p. 77-111.

⁵¹⁶ G. Châtelet, *L'enchantement du virtuel : mathématique, physique, philosophie*, Paris, Éditions Rue d'Ulm, p. 184.

⁵¹⁷ G. Châtelet, *Les enjeux du mobile*, op. cit.

⁵¹⁸ G. Deleuze, *Logique du sens*, Paris, Minuit, 1969, p. 32-34.

boîte noire de ce que nous appelons le *schématisme de l'opération*. La diagrammatologie correspond au discours sur la diagrammatique, car la diagrammatique ne dit rien, mais *fait voir et donne à lire*. L'enjeu est donc d'élaborer un dictionnaire et une grammaire visuels de la pratique, c'est-à-dire une sémiotique visuelle des opérations pratiques.

4. Schématisme diagrammatique, philosophie de la nature et morphogenèse

Le diagramme a aussi une fonction éthique, qui permet de poser le problème de la violence, c'est-à-dire celui de l'arc-réflexe du système nerveux. La civilisation commence en effet lorsqu'on détourne le circuit de l'arc-réflexe pour le transformer en une boucle sensori-motrice qui est contrôlée par modulation dans un circuit perception-action. Cette violence, lorsqu'elle est contenue, est transformée en courage si elle est séquencée en une série d'opérations intégrées. Berthoz, neurophysiologiste de la perception, a nommé « simplicité⁵¹⁹ » l'action organisée qui vise à réduire une situation complexe sans la simplifier. Notre objectif est de montrer que le diagramme est à la simplicité vitale ce que l'algorithme est à la complexité calculatoire : la formalisation d'une méthode de résolution codée dans un espace substrat disponible en mémoire, qu'elle soit nerveuse, biologique ou technique.

Dans cette perspective, le diagramme devient le schéma d'un circuit perception-action qui vise à conjurer la brutalité et la bêtise de l'arc-réflexe déclenché par un signal capteur de pulsion. Si bien que nous pouvons inscrire notre propos dans la lignée germano-balte de philosophes de la nature qui prend sa source chez Kant, passe par Jakob von Uexküll et mène à Konrad Lorenz. Le diagramme, c'est le lointain descendant du monogramme kantien et de l'éthogramme lorenzien.

Nous arrivons enfin à la formulation de notre problème. Il peut s'énoncer de la manière suivante, dans sa version kantienne, même si on peut faire remonter l'origine du problème du schématisme au *Novum organum* de Francis Bacon, le père de la science opérative (*scientia operativa*) : quelles sont les règles par lesquelles l'entendement synthétise dans le temps le chaos de l'expérience pour en faire l'objet d'une connaissance ? Reformulé, le problème peut se comprendre ainsi : comment l'esprit

⁵¹⁹ A. Berthoz, *La simplicité*, op. cit.

devient-il un sujet connaissant et agissant ? C'est la manière dont Deleuze lisait Hume : comme un philosophe de la pratique⁵²⁰ .

Mais ce n'est pas qu'une interprétation du jeune Deleuze historien de la philosophie. Si on lit Hume, on peut effectivement dire que le problème est posé de la façon suivante au 18^e siècle : comment une collection de perceptions vives devient-elle un système d'idées organisées ? C'est le problème de l'association des idées, pensée dans un paradigme newtonien. Ce problème, avant de prendre sa source dans le romantisme, s'enracine plus profondément dans la tradition des philosophies de la nature : nous pouvons faire remonter cette tradition très loin, en y incluant Newton et Galilée, les deux pères de la science moderne. Héritier de Newton, Hume reformule le problème de l'association des idées à la suite de Hobbes et de Locke en tentant d'introduire la méthode de raisonnement expérimental dans les sujets moraux, ce que souligne le sous-titre du *Traité de la nature humaine*⁵²¹.

Le rapport de la Nature à la nature humaine doit avant tout être pensé comme un accord. Il s'agit de l'accord entre la règle de la nature et la règle des représentations, ou comme l'écrit Deleuze, de « l'accord entre la règle de la reproduction des phénomènes dans la Nature et la règle de la reproduction des représentations dans l'esprit⁵²² ». Pour Hume, cet accord est un fait. Or ce fait, il faut pouvoir en rendre compte sans que cette rencontre soit une concordance hasardeuse ou une rencontre fortuite. C'est le problème de l'associationnisme, celui de l'association des idées, que nous venons d'énoncer et qu'on peut reformuler ainsi : comment le chaos de la fantaisie devient-il le système de l'imagination ordonné par les principes de la Nature ?

On sait comment Kant a repris ce problème, à travers la philosophie transcendantale dans la première *Critique* et comment il s'est confronté au problème de la finalité dans

⁵²⁰ G. Deleuze, *Empirisme et subjectivité*, op. cit.

⁵²¹ D. Hume, *Traité de la nature humaine : essai pour introduire la méthode de raisonnement expérimental dans les sujets moraux*, Paris, Flammarion, 3 vol. L'édition anglaise de référence est : D. F. Norton et M. J. Norton (eds.), *A Treatise of Human Nature : A Critical Edition*, Oxford, Clarendon Press, 2007.

⁵²² G. Deleuze, *Empirisme et subjectivité*, op. cit., p. 123.

la troisième : nous n'avons pas encore le Newton du brin d'herbe, nous l'attendons⁵²³. Nous introduisons ce problème de la finalité, car il découle du problème de la nécessité de l'accord. Le problème de la finalité de l'accord est lié à ce qu'on appelle aujourd'hui l'auto-organisation. En effet comment rendre compte de la croissance d'une totalité suivant un plan de complexification croissante (comme c'est le cas de l'organe cérébral) sans avoir recours à des arguments de nature théologique ? Nous parlons de finalité, car poser la question de la nécessité de l'accord entre la Nature et l'Esprit, pour formuler le problème dans les termes de l'idéalisme allemand, c'est poser la question du pourquoi de cet accord, donc le problème de la finalité.

Or ce problème, nous l'interprétons comme étant celui de la corrélation entre évolution et invention, c'est-à-dire comme le problème de la morphogenèse. Donc nous interprétons le problème de la synthèse comme étant le problème du schématisme ; et nous interprétons le problème de la finalité de la synthèse comme étant celui de la morphogenèse. Ce qui fait le lien entre ces deux problèmes c'est le statut de l'imagination, d'un côté comme ciment de l'univers, de l'autre comme faculté inventive.

C'est ce problème qu'Albert Einstein, grand admirateur de Hume et lecteur de Kant, a reposé à Berlin dans une conférence célèbre prononcée en 1921⁵²⁴. Ce problème, il s'enracine dans l'œuvre du second père de la science moderne : Galilée. Il concerne le statut du langage mathématique. Comme le remarque Einstein, pour autant que les mathématiques se rapportent à la réalité « elles ne sont pas certaines ; et pour autant qu'elles sont certaines, elles ne se rapportent pas à la réalité⁵²⁵ ». En 1952, trois ans avant sa mort, Einstein a envoyé une lettre à son ami Maurice Solovine dans laquelle il lui a consigné un schéma où il symbolise par une flèche le rapport entre les axiomes, c'est-à-dire les évidences de la raison, et les expériences, c'est-à-dire les évidences de l'empirie.

⁵²³ E. Kant, *Critique de la faculté de juger*, §75.

⁵²⁴ A. Einstein, *La géométrie et l'expérience*, Paris, Gauthier-Villars, 1921.

⁵²⁵ *Ibid.* p. 3-4.

L'expression qu'il emploie pour relier les premiers aux secondes est celle de « connexion intuitive⁵²⁶ ».

Nous pensons que l'espace de déploiement de cette connexion est l'espace de configuration du schématisme de l'opération que nous avons décrit plus haut, et que nous interprétons comme un schématisme de la morphogenèse. Le schématisme d'une opération est la ligne de congruence entre l'opération de la Nature et l'opération de l'Esprit. Cette coopération, cet accord, il se pense comme organisation d'une solution dans le temps de la finitude existentielle d'un être vivant et interprétant, sémiotiquement informé et mathématiquement outillé.

Ce que Simondon a appelé « opération allagmatique » dans le cadre d'une philosophie de la nature, n'est-ce pas le prototype même de ce que des théoriciens de la cognition en lutte contre les physicalistes et les computationnalistes nommeront après lui une éinaction (Varela) ? Notre hypothèse est que le paradigme d'une telle pensée éinactrice nous est déjà donné par la biosémiotique de von Uexküll. Le problème au cœur de la biosémiotique est le suivant : comment une procédure opératoire peut-elle être suivie de façon non mécanique ? N'est-ce pas une contradiction dans les termes ? Peut-être n'est-ce pas une contradiction, si l'opératoire n'est pas réductible au mécanique. L'opératoire n'est-il pas récurrent, plutôt que récursif ? Existe-t-il un modèle de réalisation de la récurrence opératoire ? Ne devrait-on pas le chercher dans une théorie de l'information vitale ? Un tel modèle de réalisation ne pourrait-il pas nous être donné grâce à l'étude scientifique des organismes les plus élémentaires, c'est-à-dire grâce à l'étude de la structure et du fonctionnement des êtres vivants les plus simples ? Dès lors quelle théorie formelle en fournirait l'axiomatique ?

Simondon a formulé cette hypothèse proprement stupéfiante à nos yeux, tant elle nous semble enveloppée de prescience :

⁵²⁶ A. Einstein, lettre à M. Solovine du 7 mai 1952, *Physique, philosophie, politique*, Paris, Seuil, 2002, p. 156. Cité par F. Balibar et R. Toncelli dans : *Einstein, Newton, Poincaré*, Paris, Belin, 2008, p. 23-24.

Topologie et chronologie coïncident dans l'individuation du vivant. (...) Topologie et chronologie ne sont pas des formes *a priori* de la sensibilité, mais la dimensionnalité du vivant s'individuant. Il faudrait donc un mot pour désigner cette dimensionnalité unique et qui plus tard se dédouble en dimensionnalité temporelle et dimensionnalité spatiale séparées. Si non seulement ce mot, mais l'ensemble de représentations unifiées permettant de lui donner un sens précis existaient, il serait possible de penser la morphogenèse, d'interpréter la signification des formes, et de comprendre cette première relation du vivant à l'univers et aux autres vivants qui ne peut se comprendre ni selon les lois du monde physique ni selon les structures du psychisme élaboré ; avant même les structures sensori-motrices, des structures chronologiques et topologiques doivent exister qui sont l'univers des tropismes, des tendances et des instincts ; la psychologie de l'expression, encore trop détachée et arbitraire bien que fondée dans ses recherches, trouverait une voie d'axiomatisation dans une semblable recherche chronologique et topologique⁵²⁷.

Or ce mot qui manque à Simondon, le mot adéquat pour désigner cette « dimensionnalité unique », il s'avère qu'il nous est donné dans un tout autre champ du savoir par quelqu'un qui n'est ni philosophe, ni biologiste, mais théoricien de la littérature russe : Mikhaïl Bakhtine. Ce mot on le trouve dans l'ouvrage posthume intitulé *Esthétique et théorie du roman* : « chronotope ». Bakhtine le définit ainsi, de façon extrêmement simple : « Nous appellerons *chronotope*, ce qui se traduit, littéralement, par “espace-temps” : la corrélation essentielle des rapports spatio-temporels⁵²⁸ ».

Une chronotopologie de la matière vivante ne serait-elle pas la bonne candidate pour construire une axiomatique de la morphogenèse aux différents ordres de grandeur de la réalité biologique, en deçà ou au-delà de la topologie et de la chronologie de l'axiomatique physique, dont la bonne candidate semble être actuellement la théorie des topos de Grothendieck telle qu'elle est appliquée à l'espace quantique dans le cadre du programme de géométrie non commutative initié par Connes, fondé sur les algèbres dites d'opérateurs⁵²⁹ ?

⁵²⁷ G. Simondon, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, op. cit., p. 227.

⁵²⁸ M. Bakhtine, *Esthétique et théorie du roman*, op. cit., p. 235.

⁵²⁹ A. Connes, Interview à l'IHES par S. Dugowson et A. Khelif, 5 février 2014.

Ce que nous a appris l'informatique théorique, c'est que le récursif est l'explication scientifique du calculable, et la calculabilité, la théorie formelle de la récursivité. Mais la récurrence opératoire, n'est-ce pas l'opération interprétative elle-même, comme mémoire d'une individuation vitale inscrite dans la matière vivante, telle que cette rétention d'information, à la fois chronologique et topologique, codée dans la matière vivante et située du côté intérieur de la limite, est ce qui à la fois rend sensible le vivant qui interprète, au niveau de la membrane polarisée, à une information nouvelle venant du monde extérieur par la métastabilité qu'il entretient du fait de cette rétention ; mais aussi ce qui rend possible l'émission d'un signal dans l'environnement, dans le monde ambiant, pour y agir suivant une causalité informationnelle se propageant transductivement, via des canaux d'abord bio-sémiotiques, ensuite sémio-techniques, une fois la vie devenue technique ?

Une « biologie technique » (*technische biologie*) est une biologie qui étudie les opérations vitales en tant qu'elles ne sont pas réductibles à des mouvements mécaniques. N'effectue une opération vitale qu'un sujet vivant qui répond à un signal, c'est-à-dire ne réagit pas à n'importe quelle stimulation physico-chimique : à la cause mécanique, il faut substituer selon Uexküll le motif interprétatif, à l'adaptation passive (*Anpassung*), l'ajustement actif (*Einpassung*)⁵³⁰. L'activité passive peut être nommée résistance ou endurance, l'activité active, invention compositionnelle. Tout le problème consiste à comprendre comment un sujet vivant sélectionne un signal en tant qu'il est porteur d'une signification vitale, et non d'une détermination causale. Au concept d'agent causal, il faut substituer le concept de caractère modal qu'Uexküll nomme « caractère perceptif » (*Merkmale*) ou « tonalité ». Dès lors, il faudrait confronter le concept uexküllien d'induction mélodique au concept simondonien d' « amplification modulatrice » ainsi qu'au concept nietzschéen de « force plastique » (*plastische Kraft*).

⁵³⁰ H. Gens, *Jakob von Uexküll explorateur des milieux vivants*, Paris, Hermann, 2014, p. 25.

Dans ce qu'Uexküll nomme le « cercle fonctionnel » (*Funktionskreis*) du sujet vivant – qu'il oppose à l'arc réflexe des behavioristes – l'induction mélodique ascendante est ce qui conduit le sujet à composer de manière contrapuntique avec son milieu par une « connexion structurale⁵³¹ » (*Gegengefüge*), connexion qui est garantie par ses schèmes comportementaux et qui se prolonge dans les performances du sujet, fermant ainsi le cercle fonctionnel par ce que von Uexküll nomme une « règle de signification ».

S'il faut bien parler d'opération modulée par une information, c'est parce qu'un concept d'opération instruit par une conception de l'information qui dépasse la dualité du code et du signal (puisqu'elle articule cette dualité dans un couplage dynamique autopoïétique) permet de rendre compte d'un mouvement centrifuge sans recourir à une quelconque force vitale (de provenance métaphysique) et sans réduire l'opération à une conséquence⁵³², c'est-à-dire à ce qui s'en suit mécaniquement d'une action physico-chimique. Une telle information pourrait être qualifiée de vitale. C'est pourquoi von Uexküll parle de biologie technique et qu'il l'oppose à la biologie mécanique : la biologie technique est celle qui met au jour les liens qui unissent les connexions structurales et les performances opératoires des êtres vivants au sein de leurs *Umwelten* respectifs.

En définissant la matière vivante comme « véhicule d'énergie informée⁵³³ », Simondon nous permet d'appréhender biologiquement ce qu'Artaud avait nommé de façon poétique « corps sans organes », expression devenue concept en 1972 dont on connaît la fortune, souvent usité par des épigones, mais rarement compris. Dix ans après Artaud (en 1958), Simondon en donne une détermination épistémologique. Or ce que dit Simondon rejoint exactement ce qu'affirme actuellement l'école estonienne de

⁵³¹ H. Gens, *Jakob von Uexküll explorateur des milieux vivants*, *op. cit.*, p. 82.

⁵³² Comme l'a remarqué Heidegger : « Les Romains traduisent, c'est-à-dire pensent, ἔργον à partir de l'*operatio* entendue comme *actio* et disent pour ἐνέργεια *actus*, un tout autre mot avec un tout autre domaine de signification. Ce qui est a-mené et pro-duit apparaît maintenant comme ce qui résulte d'une *operatio*. Le résultat est ce qui s'en suit d'une *actio* et la suit : la con-séquence. Le réel est maintenant le conséquent. La conséquence est amenée par une chose qui la précède, par la cause (*causa*). » (« Science et méditation », *Essais et conférences*, *op. cit.*, p. 55-56).

⁵³³ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 74.

biosémiotique héritière d'Uexküll. En effet, celle-ci nomme l'organisme vivant *modeling system*, suggérant ainsi comme le remarque Hadrien Gens les forces à la fois plastique et sémiotique qui en codent et en rythment la dynamique⁵³⁴. Il faudrait donc rectifier la définition biologique de la pensée proposée par l'un des grands neurobiologistes de notre temps⁵³⁵. La pensée n'est pas « le rapport adaptatif » du vivant à son milieu, mais bien son rapport d'*ajustement*. Ce rapport d'ajustement, Uexküll le pense explicitement par analogie avec la technique du contrepoint dans la composition musicale. Tout l'enjeu d'une mise en relation entre le fond dont parle Simondon et le milieu (*Umwelt*) dont parle von Uexküll est de penser l'articulation entre les signaux mélodiques provenant de l'*Umwelt* et le codage rythmique provenant du fond de la matière vivante : le produit de cette composition étant une morphogenèse dont l'épure noétique est ce que nous nommons son diagramme de résolution.

Donner des yeux au calcul, ce serait résoudre le problème de la catégorisation, et donc abolir la différence phénoménologique entre connaissance phénoménologique et connaissance scientifique.

Notre hypothèse est que la structure de diagramme semble être la structure sous-jacente d'un tel calcul (qu'on pourrait nommer calcul lucide), lorsque l'acte, événement de couplage d'une énergie libérée d'après une chaîne de causalités conditionnelles complexes (dans le cadre du vivant humain, cette chaîne est neuro-psycho-physiologique) opérant par transduction de signaux, contrôle de l'actualisation d'une énergie potentielle et organisation d'une action coordonnée par les sorties effectrices de l'organisme vivant ;

⁵³⁴ H. Gens, *Jakob von Uexküll explorateur des milieux vivants*, *op. cit.*, p. 41.

⁵³⁵ A. Prochiantz, *Géométries du vivant*, §39-40 : « Si un biologiste veut s'exprimer de plein droit sur la pensée, alors il faut qu'il le fasse à partir de sa propre discipline et, s'il est matérialiste, sans recours à une position dualiste. Bref, il nous faut une définition biologique de la pensée, qui se distingue de la question de sa localisation, faute de quoi le dualisme, sorti par la porte, reviendrait par la fenêtre. Je risque donc une telle définition : « la pensée est le rapport adaptatif entre le vivant et son milieu ». Et, dans le terme *vivant*, j'inclus les individus et les espèces. » <http://books.openedition.org/cdf/3415#ftn7>

vient s'articuler à la représentation schématique (de nature géométrique dans le cas le plus simple) de la situation problématique en cours de résolution.

Celui qui a initié une telle recherche, dans une esquisse fascinante d'à peine quelques pages, qui constituait son projet de thèse et qui a été publié de façon posthume en supplément de la publication de sa thèse principale, c'est encore Simondon. Dans le texte posthume intitulé « Allagmatique », Simondon a esquissé quelle devait être l'articulation entre la schématisation structurelle d'un problème et sa résolution opérationnelle, à travers une théorie à la fois ontologique, axiologique et analogique de l'acte d'un être vivant en proie à une activité de résolution, incarnée dans un organisme et située dans un environnement. Une telle théorie suppose que l'acte est l'absolu, en tant que passage d'une vie qui œuvre dans la souffrance de l'obstacle voire l'angoisse de l'existence. Pour être pensée dans sa totalité, la structure immanente de cet acte doit être découplée par l'activité thématique de l'esprit, qui, braquant son attention sur l'un ou l'autre versant de l'acte, va permettre de penser analytiquement l'articulation entre schématisation structurelle et résolution opérationnelle, dont la synthèse concrète, vivante et processuelle est une morphogenèse, scandée par des individuations successives soutenues par la mémoire (génétique, nerveuse ou culturelle) et orientées par des finalités sans fin (si évidemment au-delà de la mort des individus, les espèces, voire le genre humain, ne dépassent pas).

Ce qu'il faudrait dès lors articuler, c'est la théorie de l'amplification dans les processus d'information de Simondon à la théorie des systèmes autopoïétiques de Varela et Maturana. C'est le problème de la production du soi qui au cœur de cette articulation, du soi comme production énoncée, donc de l'auto-organisation à l'échelle biologique dont l'acmé se trouve dans l'organe actuellement le plus puissant produit par l'évolution : le cerveau. L'origine de la vie pourrait peut-être être trouvée dans les mécanismes de l'auto-organisation, car si nous trouvons les principes au fondement de l'auto-organisation, alors nous pourrions mettre en œuvre ces principes pour produire

spontanément et de façon dirigée, contrôlée, ces structures auto-organisées. Pourquoi ? Parce que le cerveau est le calculateur le plus puissant qui existe, il suit un plan de complexification croissante et il est auto-organisé et auto-connecté. Comme le cerveau existe en fait, c'est donc possible en droit, comme le dit le chimiste Jean-Marie Lehn⁵³⁶. L'objectif de notre programme de recherche est de montrer qu'une opération technique et vitale est un couplage de signal et de code qui en résout la tension par la production d'une forme significative. Dans le diagramme des opérations génétiques, le signal devient mélodique et le codage, rythmique : l'opération est la composition musicale d'une forme significative ; et l'herméneutique opératoire, son interprétation transformatrice et émancipatrice.

La diagrammatologie, qui est une phénoménologie de la connaissance instrumentée par le dispositif de l'ingénierie sémiotique, a ainsi pour objet les opérations d'un savoir-faire pratique symbolisées à travers des schémas d'expression codifiés dans une sémiotique diagrammatique. L'appropriation de ces schémas suppose la mise en œuvre d'un effort herméneutique visant à réactiver ces procédures finies non mécaniques en les actualisant dans des processus d'invention qui les excèdent et les amplifient.

⁵³⁶ Voir : J. Colin, *Le silence des nanos : un cyberdocumentaire sur notre avenir technologique*, Film documentaire, 2007.

BILAN DU CHAPITRE 9

Un des moyens d'articuler la pensée de Kant à celle de Simondon d'une manière productive et inventive, dans le cadre du développement de l'intelligence artificielle, serait d'articuler la philosophie des mathématiques de Peirce à la pensée du vivant de Simondon, car Peirce instancie la problématique kantienne du jugement en « sémiotisant » le jugement synthétique à travers une réflexion sur la déduction théorématique, qui est l'acte inventif par excellence déployé en mathématiques. Nous avons cherché à expliciter en quoi il est possible d'articuler le schématisme opératoire de la morphogenèse formalisé par Simondon à la pensée du jugement chez Peirce en montrant en quoi ce schématisme correspond au déploiement dynamique et vivant d'un diagramme au sens de Peirce. Diagramme et morphogenèse s'articulent dans le cadre de la problématique du schématisme et ont pour moyen terme la notion de forme.

L'article « Iconic virtues of diagrams » de B. Leclercq nous conforte dans l'idée que rapprocher le raisonnement de Simondon de celui de Peirce permet d'exhiber une analogie opératoire (et non une métaphore) entre l'évolution du sujet connaissant (morphogenèse), l'accroissement de la connaissance et la progression théorématique. B. Leclercq parle en effet d'« *ampliative reasoning* », expression qu'on ne trouve nulle part ailleurs, et qui est littéralement ce que Simondon nomme « amplification organisante » dans la conférence de Royaumont de 1962 sur l'amplification dans les processus d'information. Ce type d'amplification, qui est mis en œuvre par un être vivant doué de psychisme qui résout effectivement un problème, correspond très exactement à l'expérience mathématique qu'a cherché à décrire Cavallès à travers toute son œuvre.

Notre hypothèse est que l'intuition diagrammatique est précisément celle qui donne accès à cette expérience mathématique. Elle correspond selon nous à la saisie intuitive organique dont parlait Goethe (*anschauende Urteilskraft*). Elle procède d'une déduction théorématique au sens de Peirce. Déduction théorématique, jugement par perception intuitive et intuition diagrammatique désignent ainsi la même opération. Or l'intuition

organique goethéenne est précisément celle qui a inspiré Kant dans sa conception du jugement esthétique développée dans la troisième *Critique*. Dans un article très récent⁵³⁷, A. Schubbach soutient que le jugement esthétique kantien est une ressource pour penser les opérations de la boîte noire de l'apprentissage machine (*machine learning*).

Nos prochaines recherches viseront ainsi à étudier l'importance de l'aléa dans les mécanismes d'apprentissage dans la mesure où ils peuvent peut-être permettre d'explorer les liens entre la sérendipité, l'apprentissage et l'invention, et ainsi éclairer la pensée de l'apprentissage et du développement au regard des avancées technologiques de notre temps.

⁵³⁷ A. Schubbach, « Judging machines: philosophical aspects of deep learning », *Synthese*, vol. 198, n° 2, 2021, p. 1807-1827.

CONCLUSION GENERALE

Par ontologie, nous n'entendons pas une théorie sur l'être, mais la caractérisation progressive de la réalité objectivée à travers des pratiques qui la révèle comme un ensemble d'objets théoriques et pratiques manipulables et manipulés, catégorisables et catégorisés, mesurables et mesurés. C'est pourquoi nous ne posons pas de différence de nature entre le phénoménologique et le scientifique. Par conséquent, toute objectivité est relative à une pratique, c'est-à-dire à un système d'opérations effectuelles sur une matière concrète appréhendable et communicable, qu'elle soit physique ou sémiotique, grande ou petite, visible ou invisible, simple ou complexe.

Par exemple, il y a une objectivité du calculable dans la mesure où la récursivité est l'explication scientifique d'une telle objectivité, dont la théorie formelle nous est donnée par la théorie de la calculabilité. En effet la machine de Turing est à la fois le modèle scientifique d'explication du fonctionnement des ordinateurs modernes et la formalisation logique de la notion mathématique de fonction calculable. Une fonction est dite calculable si l'on est capable d'exhiber une méthode de calcul permettant de calculer le résultat de la fonction pour n'importe lequel de ses arguments, au terme de l'exécution d'un nombre fini d'opérations effectuées à partir d'un ensemble de ressources finies en un temps fini. Une telle méthode de calcul porte le nom de procédure effective.

La thèse de Church-Turing énonce la chose suivante : une fonction calculable au sens où nous venons de le préciser est calculable par une machine de Turing. Deux formes de cette thèse ont été distinguées dans la littérature spécialisée : une forme algorithmique et une forme empirique⁵³⁸. L'enjeu de la distinction de ces deux formes est que si l'on est capable d'opérer le calcul d'une fonction sur une machine sans être capable de l'opérer

⁵³⁸ M. Pégny, « Les deux formes de la thèse de Church-Turing et l'épistémologie du calcul », *Philosophia Scientiæ*, 16-3 | 2012, p. 39-67. Voir aussi : F. Franchette, « La thèse de l'hyper-calcul : enjeux et problèmes philosophiques », *Philosophia Scientiæ*, 16-3 | 2012, p. 17-38.

au moyen d'un algorithme, alors on dispose d'une méthode de résolution d'un problème mathématique exclusivement dépendante de l'expérience physique.

En acceptant l'équivalence entre les notions de procédure effective et de machine de Turing, Turing a prouvé que certaines fonctions ne sont pas Turing-calculables, en donnant une preuve par l'absurde de l'indécidabilité des résultats de la fonction d'arrêt en ses arguments⁵³⁹. Afin de répondre à la question de savoir s'il est possible de calculer des fonctions non Turing-calculables, c'est-à-dire qui ne sont pas calculables par machine de Turing, Turing a introduit dans sa thèse l'hypothèse d'un nouveau type de machine, appelé machine à oracle (O-machine), capable de fournir le résultat de fonctions non Turing-calculables grâce à l'oracle en question, dont il affirmait qu'il s'agissait d'un composant dont le fonctionnement interne est non mécanique.

Discutant la thèse de Turing, Gödel s'est posé la question de l'existence de procédures finies non mécaniques⁵⁴⁰, qu'il faut rapprocher du mystère enveloppé par la fonction d'un oracle, invoquée par Turing pour le calcul de fonctions non calculables par machine de Turing. Notre hypothèse est que l'oracle en question, qui procède par procédures finies non mécaniques, est l'esprit enraciné dans la matière techniquement formatée par cette machine sémiotique qu'est le diagramme. Cette matière, dualisée par le calcul et la sémiose, possède un double ancrage, matériel-physique et organico-psychique. Mais avant d'explicitier le contenu de cette proposition, il faut revenir à la caractérisation de la dimension sémiotique, qui est la condition de possibilité de la représentation de l'objectivité calculable, et commencer par répondre à la question suivante : pourquoi l'informatique est-elle une physique des signes sans signification ?

L'informatique est le traitement automatique des informations⁵⁴¹, parce qu'elle est l'ingénierie de l'information discrétisée numériquement, dont le format technique de

⁵³⁹ A. M. Turing, « Systems of Logic Based on Ordinals », *Proceedings of the London Mathematical Society*, art. cit.

⁵⁴⁰ P. Cassou-Noguès, « Gödel et la thèse de Turing », art. cit.

⁵⁴¹ G. Berry, *Penser, modéliser et maîtriser le calcul informatique*, Paris, Collège de France/Fayard, 2009.

manipulation est le codage binaire, et dont le support virtuel opératoire et calculatoire est la machine de Turing. Elle est aussi une science, car les lois qui régissent ses manipulations sont les lois du calcul, formalisées à travers des algorithmes. Qu'est-ce qu'un algorithme ?

C'est un calcul effectuable sur des codages, c'est-à-dire sur de l'information discrétisée numériquement et techniquement manipulée dans un format binaire. Mais les signes manipulés ne signifient rien dans la mesure où ils ne le sont qu'en fonction de leur forme syntaxique (définie par le langage de programmation utilisé) et non de la signification qui leur est associée (purement conventionnelle et extrinsèque à la manipulation calculatoire). Comme la manipulation n'est pas fondée sur la nature physique des symboles manipulés, mais sur les règles syntaxiques du langage de programmation utilisé, un algorithme et son exécution ne dépendent pas de la nature physique de l'ordinateur qui les réalise. C'est la raison pour laquelle l'informatique a pu être définie comme une physique abstraite des signes⁵⁴². « Physique des signes » dans la mesure où ces derniers sont manipulés de manière purement mécanique ; « physique abstraite » dans la mesure où les lois qui la concernent ne sont pas relatives à la matière, mais au temps.

Suivant ces principes de codage numérique de l'information et de codage numérique des transformations à opérer sur des informations numérisées, il est possible d'obtenir le code résultat des données d'un problème et de sa méthode de résolution pour lequel l'exécution d'un programme enregistré sur une machine de Turing permet d'obtenir une résolution automatique du problème numérisé. Dès lors on peut se poser la question suivante : comment une physique de signes ininterprétés peut-elle devenir une physique des signes investis d'esprit ?

En opérant non plus un traitement automatique d'informations numérisées mais un traitement automatique des connaissances, comme l'a prouvé l'ingénierie des

⁵⁴² B. Bachimont, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances*, op. cit., p. 16.

connaissances. En effet, en opérant la modélisation de contenus véhiculés par des représentations linguistiques grâce à des représentations logiques formelles enrégimentées dans des processus calculatoires, l'ingénierie des connaissances a prouvé qu'il était possible de produire de nouvelles connaissances interprétables dans des domaines d'expertise⁵⁴³.

Cette production résulte du couplage du formalisme logique comme principe de modélisation (hérité du positivisme logique) au formalisme computationnel comme principe d'effectivité (hérité de la théorie du calcul). Elle est la preuve administrée par la pratique que l'IA forte conçue comme un cognitivisme physique ou un cognitivisme computationnel est incapable de rendre compte de la production de nouvelles connaissances interprétables, produites par un support calculatoire auquel elles ne se réduisent pas, puisque ces connaissances constituent le supplément d'une « raison computationnelle », venant instrumenter la résolution de problèmes dans des domaines d'expertise⁵⁴⁴. Ces résolutions s'opèrent grâce à l'usage des artefacts informatiques, qui ne se substituent pas aux hommes, mais leur proposent des solutions plausibles évaluables par leur faculté de juger. Dès lors on peut se poser la question suivante : comment une physique de signes investis d'esprit peut-elle devenir une algèbre symbolique pourvue de sens ?

En devenant une techno-sémiotique des opérations symboliques où coexistent sur un même support graphique sens et calcul. Comment est-ce possible ? En construisant des diagrammes. Car les diagrammes sont des machines sémiotiques qui produisent des calculs qui ont du sens. Dans cette mesure, ce sont de nouveaux supports de connaissances, qui donnent accès à des fonctionnements signifiants et rendent possible des manipulations pourvues de sens.

⁵⁴³ B. Bachimont, *Herméneutique matérielle et Artéfacture*, *op. cit.*

⁵⁴⁴ B. Bachimont, *Arts et sciences du numérique*, *op. cit.*

Ce sont aussi des objets techniques graphiques qu'on peut décliner de plusieurs façons : instrumentant notre perception, les diagrammes se révèlent être des amplificateurs d'intuitions⁵⁴⁵, comme en témoignent des diagrammes en physique comme ceux de Minkowski ou de Penrose-Carter. Machinant des théories, ce sont aussi des producteurs de conséquences déductibles, comme en témoigne le diagramme de Darwin, qui géométrise de manière fractale dans l'espace d'une feuille de papier la théorie de l'évolution des espèces telle qu'elle était alors théorisée en 1859, relativement à des séries d'observations interprétées à partir d'un corps d'hypothèses théoriques qui étaient celles de Darwin. Outillant des opérations cognitives, ce sont de véritables outils sémiotiques prolongeant l'œil, la main et la voix dans des espaces sémiotiques. Instrumentant des pratiques non théoriques et ordinaires (pratiques divertissantes, ludiques, etc.), artisanales ou artistiques (qu'elles soient individuelles ou collectives), les diagrammes sont aussi des systèmes symboliques notationnels, qui fournissent des méthodes d'exécution fondées sur des règles de grammaires gestuelles pourvues de sens. On peut dès lors distinguer trois types de méthodes, corrélées à trois types de synthèse, dont la fonction est toujours d'unifier un divers pour produire une intelligibilité du monde.

La *synthèse discursive*, fondée sur des procédés rhétoriques qui forment une méthode de remémoration qui mêle invention et mémoire comme par exemple les cinq procédés de la rhétorique antique et médiévale : invention, élocution, disposition, action, mémorisation⁵⁴⁶. La *synthèse spatiale*, sur laquelle repose la raison graphique et ses structures associées (listes, tableaux, formules) qui permettent au cours de l'histoire de la rationalité de constituer une méthode logique, qui procède par concepts, jugements et raisonnements. Enfin un troisième type de synthèse : la *synthèse calculée*, sur laquelle repose la raison computationnelle et ses structures associées (programmes, réseaux,

⁵⁴⁵ G. Châtelet, *Les enjeux du mobile*, op. cit.

⁵⁴⁶ B. Bachimont, « Signes formels et computation numérique », art. cit.

couches), qui forment des méthodes dont le suivi est délégué à des machines computationnelles qui procèdent par exploration systématique d'espaces de calcul⁵⁴⁷.

À travers notre étude des diagrammes, nous avons réussi à identifier un quatrième type de synthèse, qui n'est ni la synthèse discursive (fondée sur les arts de la mémoire), ni la synthèse spatiale (fondée sur les structures de la raison graphique) ni la synthèse calculée (fondée sur les structures de la raison computationnelle). Nous la nommons la *synthèse analogique*. Elle est fondée pas à pas sur les intuitions des opérations non calculables de l'expérience que présentent selon nous les diagrammes.

Rappelons en effet que si un diagramme désigne un schéma de résolution partiellement non calculable, c'est parce qu'il est une représentation graphique porteuse d'un supplément sémiotique qui excède et complète toute dimension algorithmique. Ce complément diagrammatique permet de donner accès aux contenus perdus par la représentation algorithmique de l'expérience (parce que négligés). Le contenu auquel donne accès le diagramme est donc une *finitude non calculable* dont il permet l'intuition. Mais l'intuition de ce contenu suppose une conscience.

Le diagramme figure des opérations, mais ces opérations doivent être non calculables, sous peine de transformer le diagramme en algorithme. C'est donc l'abstraction d'une chaîne opératoire dont l'organisation sémiotique nous donne une *méthode de résolution non calculatoire* dont le corrélat est par conséquent une *synthèse de l'imagination diagrammatique comme imagination inventive qui interprète analogiquement le diagramme en le manipulant pour agir intelligemment dans le monde*.

Or cette synthèse est un *acte analogique* effectué par intuition diagrammatique sur la finitude non calculable de l'expérience telle qu'elle est présentée dans le diagramme en vertu de son *iconicité opérationnelle*. L'acte analogique est une analogie au carré dans la mesure où il s'agit de l'intuition du couplage nature/esprit tel qu'il est externalisé dans cet objet techno-graphique qu'est le diagramme. Dans l'intuition diagrammatique,

⁵⁴⁷ B. Bachimont, « L'intelligence artificielle comme écriture dynamique », art. cit.

l'esprit énonce l'opération non calculable présentifiée par le diagramme. Il y a énonciation dans la mesure où le diagramme est à la fois un modèle et un outil. Le diagramme est aussi une méthode générative, car en tant que modèle d'une opération non calculable, son mode d'emploi explicite comment il faut le lire pour exécuter cette opération et faire ce qu'elle prescrit. Le diagramme est donc un modèle dont l'explicitation du mode de fonctionnement permet de le transformer en outil et dont le mode d'emploi prescrit comment il faut l'utiliser pour reproduire ce dont il parle.

La raison analogique qui se constitue dans la fréquentation des diagrammes est ainsi une conservation : elle permet de garder la richesse interprétative de la matière sémiotique malgré sa manipulation calculatoire. Le diagramme, dans son effectivité matérielle, ne remplace pas l'analogie qu'il modélise mais y reconduit, ce pourquoi l'analogie est une clé d'entrée dans le monde. La diagrammatique ne peut donc pas être réduite à l'intelligibilité d'une pure théorie philosophique et ne relève pourtant pas de l'explicabilité d'une théorie scientifique. Elle participe d'une compréhension ingénieuse de l'écriture conçue comme une technologie graphique, située au croisement des sciences de la nature et des sciences de la culture.

ANNEXE 1. CORPUS DE DIAGRAMMES

INTRODUCTION

Ce corpus a été construit à partir de l'exploration de l'encyclopédie universelle et multilingue *Wikipedia*. Nous avons consulté les notices allemandes, anglaises, espagnoles, françaises et italiennes disponibles à propos de tous les diagrammes que l'encyclopédie répertorie. Nous ne prétendons pas fournir une liste exhaustive de tous les types de diagrammes existant. Cependant nous pensons qu'elle tend vers une certaine complétude. En examinant les sources des notices encyclopédiques, nous avons pu consulter des sources originales ainsi que des sources secondaires concernant les différents types répertoriés. La consultation de sources secondaires nous a permis d'accéder à de nouvelles sources originales, parfois absentes des notices encyclopédiques. Des objets graphiques que la langue française dénomme *diagramme* sont parfois désignés en anglais par les termes *plot*, *chart* ou *graph*. Inversement, ce que le français appelle *schéma* peut parfois être nommé en anglais *diagram*. De plus, beaucoup de représentations graphiques que le français nomme *diagramme* ne sont pas des diagrammes mais des pseudo-diagrammes.

Pour être un diagramme, une représentation graphique doit en effet être un système de signes qui fonctionne et peut produire un résultat tout en restant signifiant. Car un diagramme est une machine sémiotique, dans la mesure où il possède *toujours* une dimension sémiotique et une dimension calculatoire, dont les proportions peuvent varier. De plus, un diagramme doit pouvoir être manipulable par l'œil dans un acte de lecture qui conduit à un faire. Cette manipulation, habitée d'un sens, peut correspondre à l'accomplissement d'une performance (artistique, ludique, cognitive, etc.), qu'elle soit individuelle ou collective (chorégraphie, interprétation musicale, jonglerie, partie d'échecs, etc.). Elle peut conditionner une opération cognitive menant à l'intuition d'objets nouveaux ou à la découverte de nouvelles propriétés théoriques (raisonnement diagrammatique, preuve diagrammatique, etc.). Elle peut être facilitée grâce au design

de la notation d'un calcul (diagramme de Feynman, diagramme de Randolph, etc.). Enfin, cette manipulation peut conduire à une construction concrète (mode d'emploi) ou à une action collective (gestion de projet, art militaire, etc.).

Nous proposons un corpus de diagrammes comprenant 66 entrées classées suivant 7 catégories de représentations graphiques : 1. *Schémas* ; 2. *Cartes et cartogrammes* ; 3. *Représentations graphiques de données* ; 4. *Graphes* ; 5. *Graphiques* ; 6. *Méthodes graphiques* ; 7. *Diagrammes*.

Notre corpus est organisé de la manière suivante : les catégories permettent d'ordonner les objets graphiques qui portent la dénomination de « diagramme », des moins diagrammatiques au plus diagrammatiques. Les diagrammes classés dans la catégorie des schémas sont les diagrammes *les moins diagrammatiques*. Les diagrammes classés dans les catégories de méthodes graphiques (langages de modélisation graphique, méthodes planificatrices, mode d'emploi, systèmes de notation) et de diagrammes en tant que tels sont *les plus diagrammatiques*.

L'ordre des sous-catégories (schéma classificatoire, schémas non classificatoires, etc.) ne suit pas un ordre hiérarchique mais alphabétique. Lorsque le glossaire présente une entrée correspondant à un type de diagramme déjà analysé dans le corps de notre mémoire, nous renvoyons le lecteur au passage exact où le type est analysé. Lorsque le glossaire présente une entrée correspondant à un type de diagramme qui n'a pas encore fait l'objet d'une analyse dans le corps du mémoire, nous proposons une définition succincte ou une notice analytique et pédagogique plus ou moins développée, toujours illustrée par un exemple. À la fin de chaque entrée, nous renvoyons le lecteur aux représentations graphiques connexes, qui peuvent porter la dénomination de diagramme mais pas nécessairement, et qui n'ont pas forcément fait l'objet d'une entrée distincte dans la mesure où elles se présentent, *grosso modo*, comme des variétés des types déjà analysés. Enfin, pour achever ce corpus, nous donnons les sources bibliographiques et sitographiques qui nous ont permis de rédiger les entrées proposées.

1. SCHEMAS

1.1 Schéma classificatoire

1.1.1 Diagramme de Streckeisen (*QAPF Diagram*)

Un diagramme QAPF est un losange composé de deux diagrammes ternaires. Il est utilisé pour classer les roches magmatiques en fonction de leur composition minéralogique. Il comprend quatre pôles, qui correspondent aux quatre groupes de minéraux suivants : **Q**uartz, **A**lcalins, **P**lagioclases et **F**eldspathoïdes. Les pourcentages de Q, A, P et F sont normalisés pour que leur somme, à l'intérieur de chaque diagramme ternaire, soit égale à 100 %.

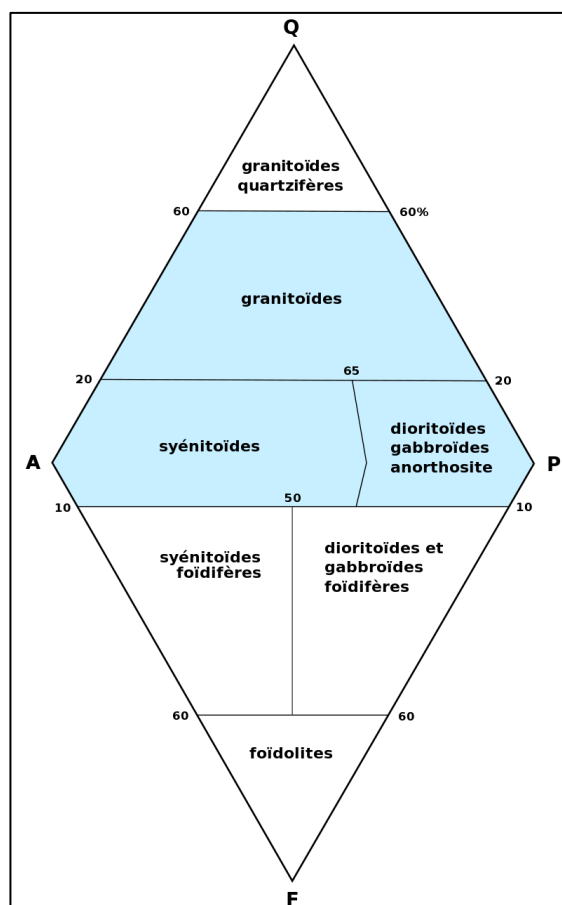


Figure 143 : Diagramme QAPF simplifié des roches plutoniques⁵⁴⁸

⁵⁴⁸https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Streckeisen_for_volcanic_igneous_rocks_fr.svg

Représentations graphiques connexes : diagrammes ternaires.

1.2 Schémas non classificatoires

1.2.1 Diagramme de Bachman (*Data structure diagram*)

Les diagrammes de Bachman forment un modèle graphique de représentation des données qui a été introduit dans l'article fondateur de Charles Bachman intitulé "Data Structure Diagrams". C'est l'un des premiers diagrammes de structure de données. Ce modèle est principalement utilisé dans la conception de bases de données. Le diagramme de Bachmann suivant montre que deux classes d'entités (département et employés) existent et qu'elles sont liées par un ensemble nommé « affectation » :

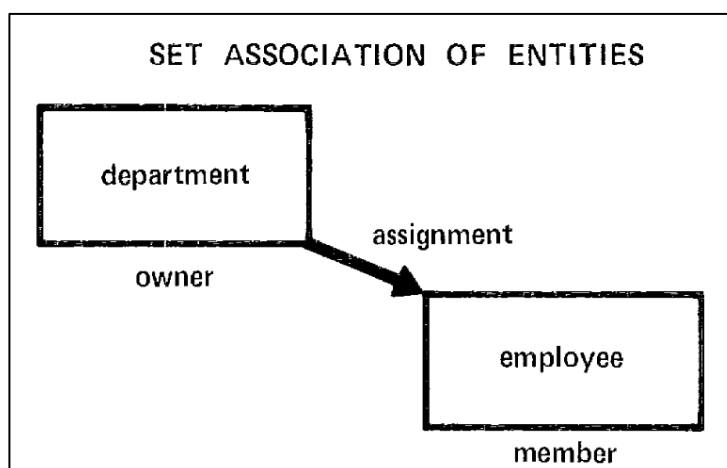


Figure 144 : Diagramme de Bachman⁵⁴⁹

La direction de la flèche signifie que chaque employé est membre d'un ensemble d'employés qui appartiennent à un département particulier, et que chaque département possède un tel ensemble d'employés.

Représentations graphiques connexes : diagrammes UML.

⁵⁴⁹ Source: C. W. Bachman, « Data structure diagrams », *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, vol. 1, n° 2, 1969, p. 5, Figure 5.

1.2.2 Diagramme bête à cornes

Le diagramme bête à cornes est un outil graphique appartenant à la méthode APTE (APplication aux Techniques d'Entreprise), destinée à la conduite de projet, créée en 1964 par Gilbert Barbey, un consultant du cabinet K. B. White. Elle est introduite à la suite des travaux de Lawrence D. Miles, inventeur d'une nouvelle méthode d'optimisation connue aujourd'hui sous le nom d'ingénierie de la valeur (*value engineering*). Le bête à cornes permet de représenter graphiquement l'expression du besoin d'un client dans le cadre d'une analyse dite fonctionnelle afin de concevoir le produit y répondant.

La première étape de l'analyse fonctionnelle consiste à exprimer le besoin de l'utilisateur, c'est-à-dire le désir ou la nécessité qu'il éprouve (se nourrir, voyager, s'amuser, etc.). On peut distinguer trois types de besoin : les besoins explicites, les besoins implicites et les besoins latents. Les premiers sont exprimés clairement par l'utilisateur ; les deuxièmes renvoient à des besoins ressentis mais non exprimés ; les troisièmes correspondent à des besoins non détectés. Le produit est ce qui répond au besoin de façon ciblée et pertinente. La réponse à un besoin implique la réponse à trois questions : à qui le produit rend-il service ? Sur quoi le produit agit-il ? Dans quel but ? L'énoncé d'un besoin se traduit alors à travers un diagramme dit *bête à cornes* en raison de sa forme en tête de bœuf. Si on prend l'exemple d'un aspirateur ménager, c'est-à-dire d'un appareil électroménager qui permet à un utilisateur d'enlever de la poussière, on doit donc remplir le diagramme « bête à cornes » suivant :

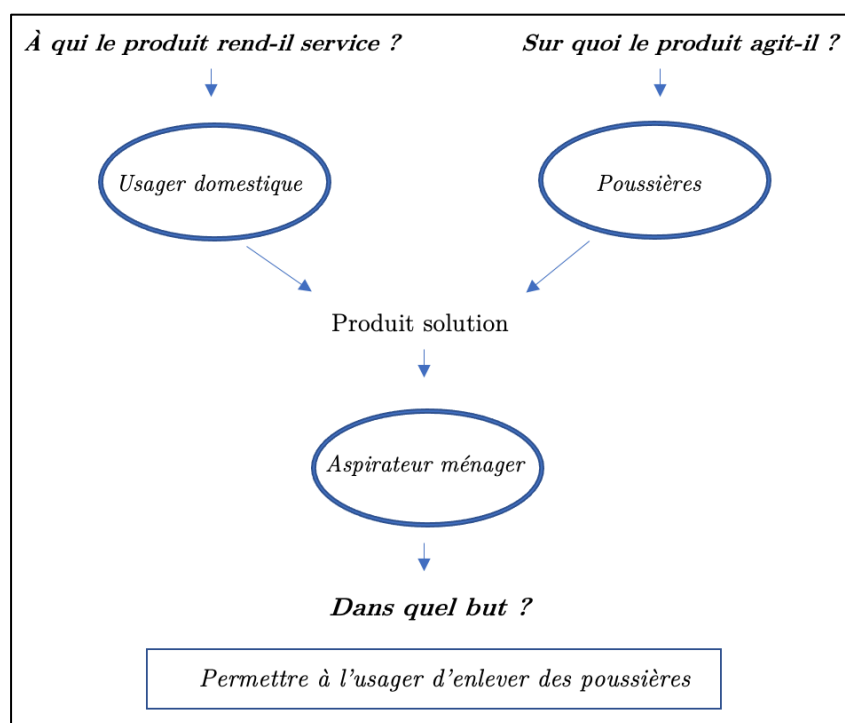


Figure 145 : Diagramme bête à cornes

L'analyse fonctionnelle se divise en deux parties : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne. Dans l'analyse fonctionnelle externe, l'utilisateur exprime son besoin sous forme de *fonctions de service*. L'analyse fonctionnelle externe décrit donc le point de vue de l'utilisateur. Deux étapes structurent l'analyse fonctionnelle externe : l'énonciation des besoins de l'utilisateur et l'étude de la faisabilité du projet par le concepteur. Le travail de l'analyse fonctionnelle interne consiste quant à lui à convertir les fonctions de service en *fonctions techniques* et en *solutions constructives*. Il s'agit de concevoir pour réaliser un produit qui répond au besoin d'un utilisateur. La personne chargée de cette tâche est donc appelée le *concepteur*. L'analyse fonctionnelle interne décrit le point de vue du concepteur. L'énonciation des besoins s'exprime à travers un diagramme bête à cornes, dans lequel on exprime la fonction principale utilisateur et la matière d'œuvre sur laquelle agit le produit. L'étude de la faisabilité s'exprime quant à elle à travers un *diagramme pieuvre*, témoin de l'identification des fonctions de service.

Représentations graphiques connexes : diagramme pieuvre, diagramme FAST, diagrammes SADT (actigramme et datagramme).

1.2.3 Diagramme d'Euler : voir chapitre 1, 4.2

Représentations graphiques connexes : diagramme de Carroll, diagramme de Randolph, diagramme de Venn, graphe existentiel, *Spider diagram*.

2. CARTES ET CARTOGRAMMES

2.1 Diagramme d'acheminement (*Routing diagram*)

Originellement, un diagramme d'acheminement ou diagramme de routage (*routing diagram*) est un outil graphique utilisé dans un projet d'implantation d'usine pour étudier les différentes configurations physiques possibles de ses installations. Introduit en 1909 par Charles Day dans son article intitulé « The Routing Diagram as a Basis for Laying Out Industrial Plants », il est utilisé en gestion de projet d'ingénierie (*Engineering management*).

La méthode graphique présentée par Day consiste en deux types de diagramme. Le premier, en perspective, qu'on trouve dans son ouvrage de 1911 intitulé *Industrial Plants* (p. 126), montre les chemins suivis pendant la fabrication des principales pièces et composants assemblés dans la construction des automobiles à essence :

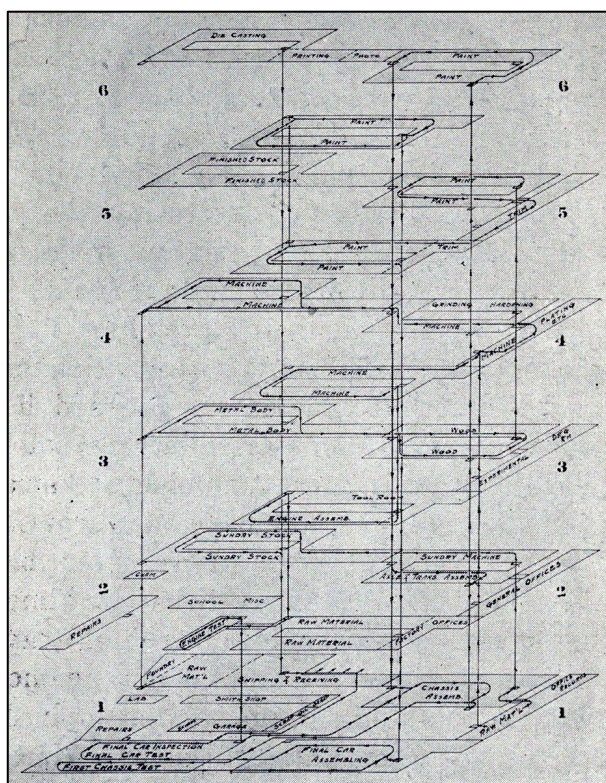


Figure 146 : Diagramme d'acheminement en perspective, par Charles Day⁵⁵⁰

⁵⁵⁰[https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Day_\(1879-1931\)#/media/File:Perspective_routing_diagram,_in_outline,_showing_paths_followed_during_manufacture_of_principal_units_entering_into_gasoline_automobiles,_1911.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Day_(1879-1931)#/media/File:Perspective_routing_diagram,_in_outline,_showing_paths_followed_during_manufacture_of_principal_units_entering_into_gasoline_automobiles,_1911.jpg)

Le second type de diagramme, détaillé, qu'on trouve dans le même ouvrage (p. 131), représente les équipements, les chemins suivis et les pièces d'assemblage dans une usine de wagons et d'essieux de wagons :

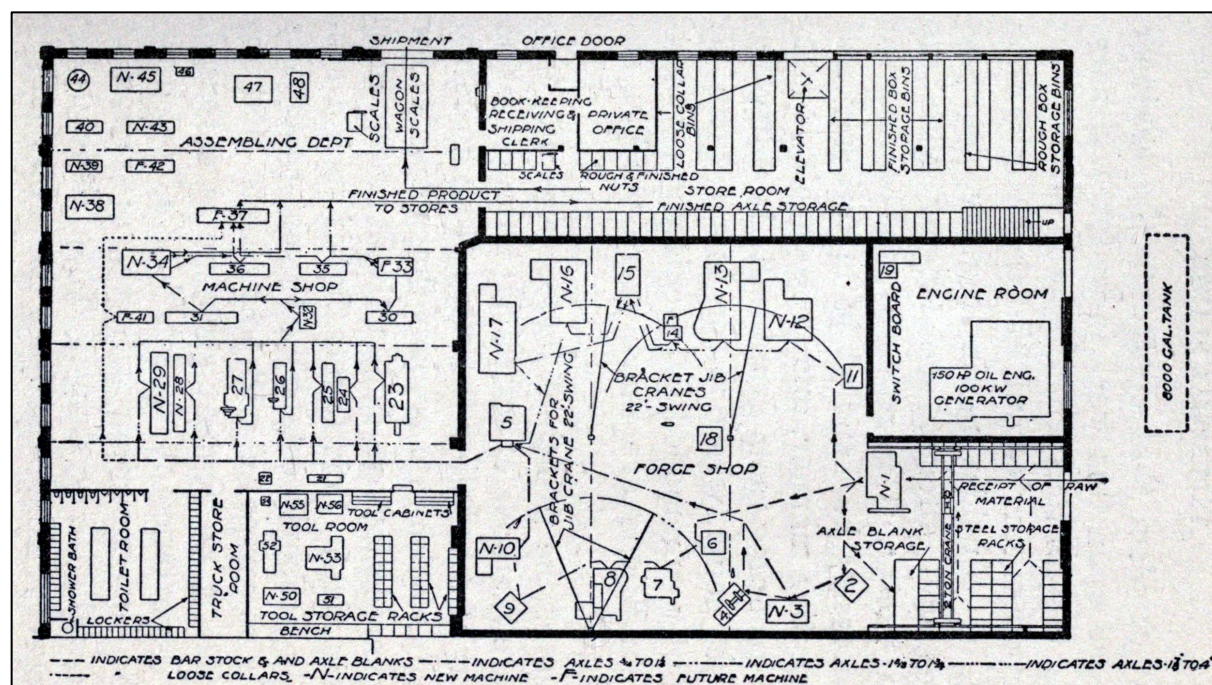


Figure 147 : Diagramme d'acheminement, par Charles Day⁵⁵¹

Par extension, un diagramme d'acheminement désigne la représentation graphique des chemins qui peuvent être empruntés dans un réseau, qu'il soit par exemple téléphonique ou informatique, ou qu'il concerne les transports publics. La formalisation des diagrammes de routage conduit à l'application de la théorie des graphes à la topologie des réseaux.

⁵⁵¹https://en.wikipedia.org/wiki/Routing_diagram#/media/File:Detail_Routing_Diagram,_Machine-tool_equipment_and_paths_or_parts_in_a_wagon-and_carriage-axle_plant,_1911.jpg

2.2 Diagramme de Hertzsprung-Russell : voir chapitre 4, 3.2.1

2.3 Diagramme Isotype : voir chapitre 4, 3.2.2

2.4 Diagramme de Schlegel

Un diagramme de Schlegel est un graphe planaire associé à un polyèdre. Ses nœuds et ses lignes correspondent aux sommets et aux arêtes du polyèdre qu'il représente. Pour donner des exemples simples, les diagrammes de Schlegel associés aux cinq solides platoniciens (tétraèdre, cube, octaèdre, dodécaèdre et icosaèdre) sont respectivement les suivants :

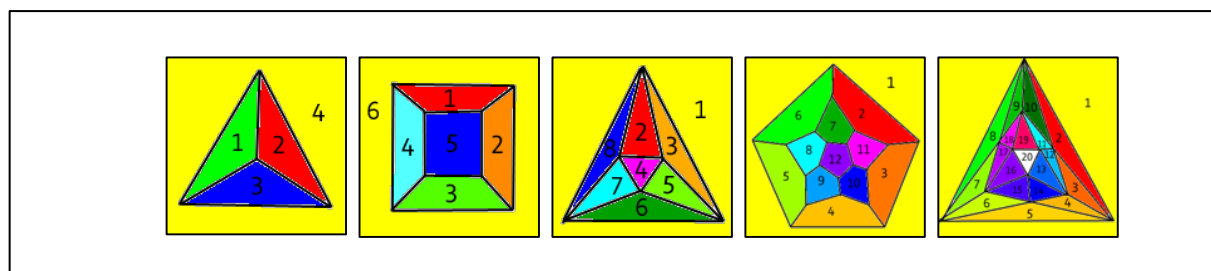


Figure 148 : Diagrammes de Schlegel des cinq solides platoniciens⁵⁵²

Les zones colorées en jaune représentent les faces retirées au terme des projections stéréographiques qui permettent de construire les diagrammes associés aux polyèdres dont ils sont les représentations.

Représentations graphiques connexes : diagramme de Coxeter, diagramme de Dynkin.

⁵⁵²https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Schlegel

2.5 Planning chemin de fer (*Time-distance diagram*)

Diagramme de planification qui tire son origine de l'organisation du transport ferroviaire. Il peut aussi être utilisé dans le bâtiment et les travaux publics.

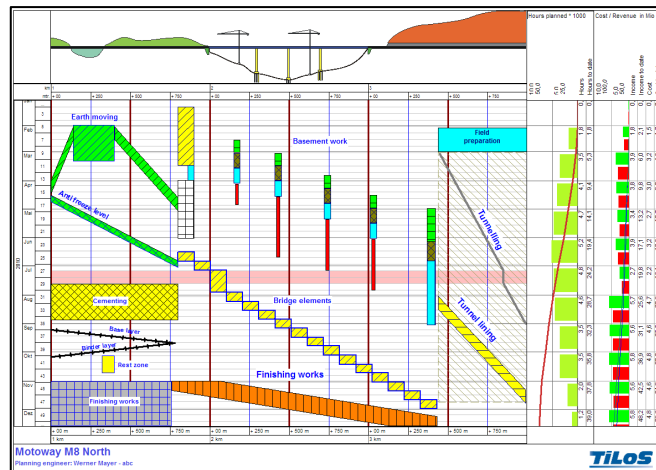


Figure 149 : Planning chemin de fer pour la construction d'une autoroute⁵⁵³

⁵⁵³https://en.wikipedia.org/wiki/Time%E2%80%93distance_diagram#/media/File:TCC_Motorway_Example.png

3. REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DE DONNEES

3.1 Diagramme en bâtons : voir chapitre 4, 3.1.1

Diagrammes connexes : diagramme circulaire, diagramme de Kiviat, diagramme de Lexis, diagramme de série chronologique.

3.2 Diagramme de Lexis

À la fin du 19^e siècle, les démographes ont construit un graphique pour représenter la dynamique d'une population. Ce graphique est connu sous le nom de diagramme de Lexis. Il situe sur un même plan les trois coordonnées démographiques classiques que sont la date, l'âge et le moment de la naissance. Dans l'exemple des décès, les trois coordonnées sont : la date de survenance du décès, l'âge du décédé au moment du décès et le moment de naissance du décédé. Le diagramme ne comporte que deux axes : celui des naissances (axe horizontal) et celui des âges (axe vertical). Ces deux types de coordonnées sont représentées par des lignes perpendiculaires à leur axe. Le décès d'un individu peut donc être représenté par un point dans le plan, à l'intersection de deux droites perpendiculaires aux deux axes. De même, des ensembles de décès peuvent être représentés par des surfaces. Deux lignes parallèles verticales, horizontales ou obliques forment des couloirs, qui permettent de visualiser les événements affectant les effectifs d'une population en fonction du temps. Les couloirs horizontaux permettent d'identifier des tranches d'âges (couloir bleu), les couloirs verticaux des périodes temporelles (couloir rouge) et les couloirs obliques des générations (couloir vert). Par exemple, le triangle orange, qui correspond à l'intersection de trois couloirs du diagramme de Lexis suivant, inclut tous les décès survenus à un an révolu en 2005 pour des individus nés en 2003 :

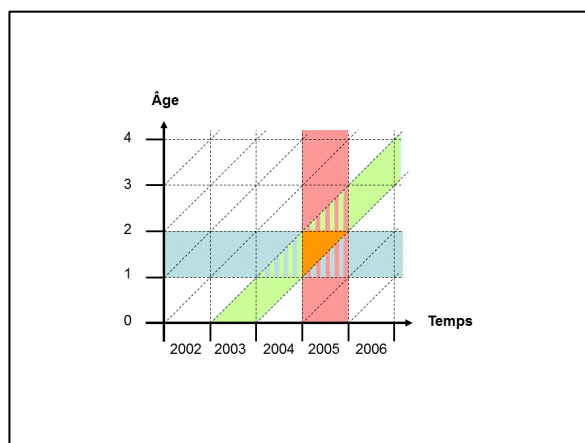


Figure 150 : Diagramme de Lexis⁵⁵⁴

3.3 Diagramme de Sankey

Diagramme de flux dans lequel la largeur des tuyaux est proportionnelle au flux représenté. Il doit son nom à Matthew Henry Phineas Riall Sankey, qui l'utilisa pour la première fois à la fin du 19^e siècle dans une étude sur l'efficacité énergétique de la machine à vapeur. Il peut par exemple être utilisé pour représenter le bilan énergétique d'un pays, en montrant les relations entre les sources d'énergie primaire, les consommations par secteur d'activité et les pertes :

⁵⁵⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Lexis#/media/Fichier:DL_CVds_12_V03.png

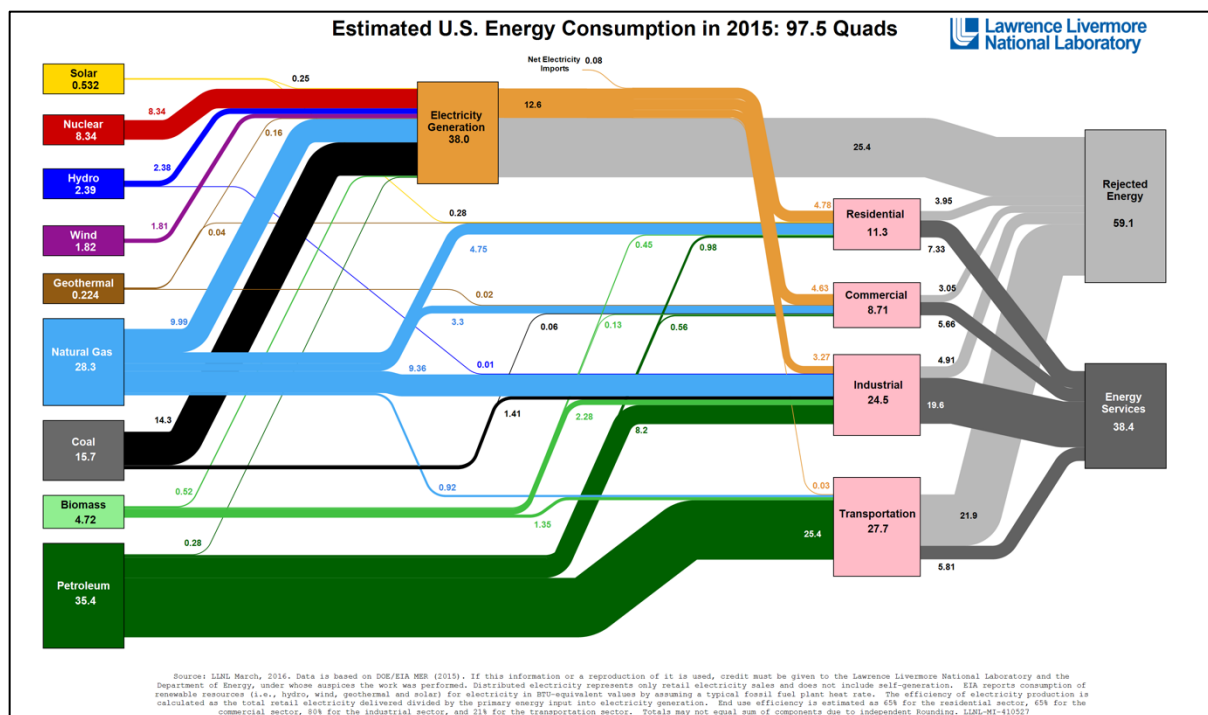


Figure 151 : Diagramme de Sankey du bilan énergétique des États-Unis en 2015⁵⁵⁵

⁵⁵⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Sankey#/media/Fichier:Energy_US_2015.png

4. GRAPHES

4.1 Diagramme commutatif : voir chapitre 2, 2.2.3

Représentations graphiques connexes : diagramme sagittal, *String diagram*.

4.2 Diagramme FAST

L'analyse fonctionnelle a pour but de concevoir le produit destiné à répondre au besoin d'un utilisateur. L'analyse fonctionnelle interne consiste à traduire les fonctions de service en fonctions techniques. Il s'agit donc de trouver les fonctions techniques qui assurent les fonctions de service déjà identifiées dans l'analyse fonctionnelle externe. Pour opérer l'analyse fonctionnelle interne, on utilise deux diagrammes : le diagramme FAST, et le diagramme SADT. Avant d'analyser un exemple de diagramme FAST, il faut définir ce qu'est une fonction technique. Une fonction technique peut se définir comme une opération interne au produit, c'est-à-dire entre ses constituants, choisie par le concepteur, afin d'assurer les fonctions de service. La fonction technique est choisie par le concepteur pour assurer la fonction de service destinée à l'utilisateur. Convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique est un exemple de fonction technique.

Pour convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, on doit refroidir un circuit électronique en fonctionnement, car celui-ci chauffe. Pour refroidir le circuit, on doit donc ajouter un composant permettant d'opérer ce refroidissement. Enfin, on doit minimiser les pertes par frottement pour éviter le gaspillage de l'énergie car les composants en mouvement créent un tel frottement. Dès lors, le concepteur traduit les fonctions de service en fonctions techniques à travers un diagramme FAST (*Functional Analysis System Technic*), qu'on peut traduire par *diagramme d'analyse fonctionnelle d'un système technique*. Le diagramme FAST se construit comme suit : tout d'abord il faut représenter la fonction de service principale par un premier bloc. Le travail du concepteur consiste alors à trouver une fonction technique permettant d'assurer cette fonction principale de service, qu'on représente par un second bloc qu'on relie au premier

bloc. Une fois trouvée la fonction technique, il faut chercher un composant technique concret qui l'incarne (mécanique, électrique ou électronique) qui va permettre d'assurer cette fonction technique. Lorsque ce composant a été trouvé, on dispose d'une solution constructive.

La fonction principale d'un aspirateur est d'aspirer, c'est-à-dire d'enlever la poussière. La fonction de service « Enlever la poussière » se réalise en trois fonctions techniques : 1° aspirer la poussière ; 2° séparer la poussière de l'air ; 3° évacuer la poussière. Mais aspirer la poussière peut s'interpréter grâce à une autre fonction technique : celle qui consiste à créer un flux d'air. De même la fonction technique « Séparer la poussière » peut s'interpréter par une autre fonction technique : « Filtrer l'air ». Enfin « Évacuer la poussière » peut s'interpréter par la fonction technique « Stocker la poussière ». La solution constructive pour créer un flux d'air va consister à utiliser une turbine, car une turbine, dès lors qu'on lui donne une énergie mécanique, produit un flux d'air en tournant. Pour filtrer l'air, la solution constructive consiste à utiliser des filtres. Enfin pour stocker la poussière, on utilise un sac. Le diagramme FAST traduisant les solutions constructives réalisant la fonction principale de départ est donc le suivant :

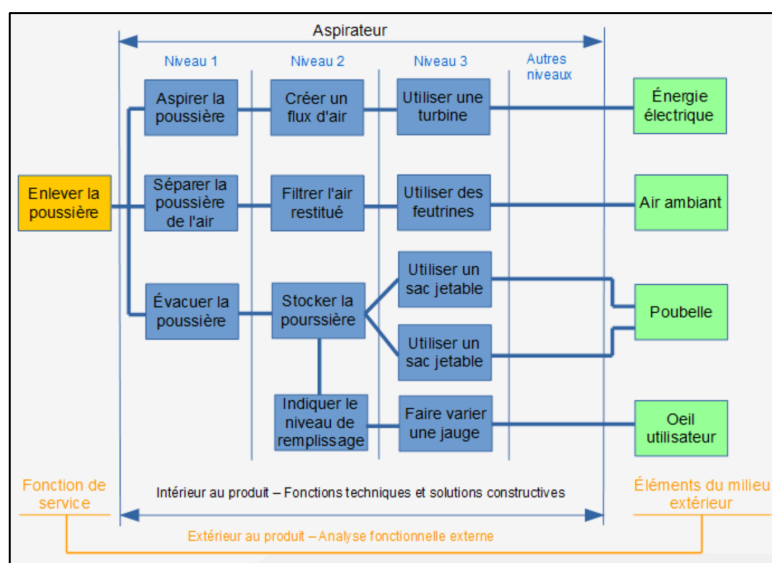


Figure 152 : Diagramme FAST d'un aspirateur⁵⁵⁶

⁵⁵⁶ <http://jackadit.com/index.php?p=ecoconception3>

Représentations graphiques connexes : diagramme bête à cornes, diagramme pieuvre, diagramme SADT.

4.3 Diagramme de Ferrers : voir chapitre 4, 4.2

Représentation graphique connexe : treillis d'Young.

4.4 Diagrammes de flux (diagramme de contexte et diagramme de flux de données) : voir chapitre 2, 2.2.1

Représentations graphiques connexes : diagrammes UML.

4.5 Diagramme de Hasse : voir chapitre 4, 4.1

Représentations graphiques connexes : diagramme sagittal, treillis d'Young.

4.6 Diagramme d'influence

4.7 Diagramme sagittal

Graphe qui représente les relations entre les éléments de deux ensembles finis au moyen de flèches afin de visualiser la nature de l'application qui les relie.

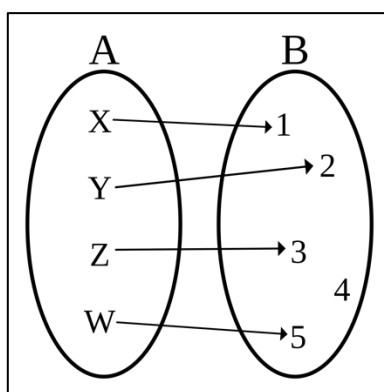


Figure 153 : Diagramme sagittal de l'injection de l'ensemble A dans l'ensemble B⁵⁵⁷

Représentations graphiques connexes : diagramme commutatif.

⁵⁵⁷https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_sagittal#/media/Fichier:Gen_injection_not_surjection.svg

4.8 Diagramme spaghetti

Grphe qui représente les déplacements de différentes entités (personnels, objets physiques, pièces, dossiers, etc.) dans un environnement de travail par exemple. C'est un cartogramme composé d'un entrelacement de lignes dont la forme fait penser à un plat de spaghetti, d'où sa dénomination. Il fournit des informations qui permettent de résoudre des problèmes d'optimisation en termes de déplacements (temps d'écoulement, engorgement de trajets, etc.).

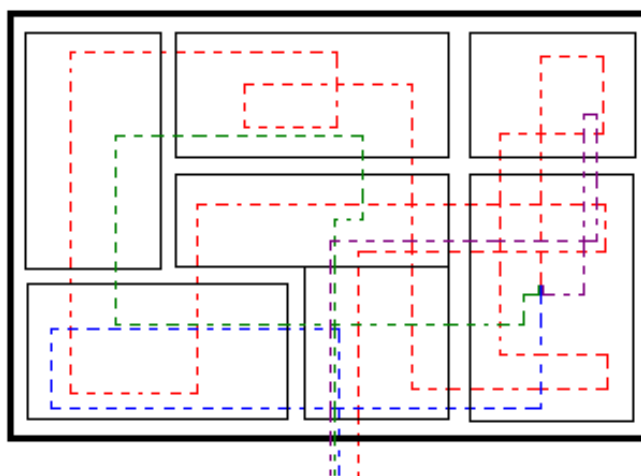


Figure 154 : Diagramme spaghetti des trajets des composants d'un produit lors de leur assemblage pour sa production⁵⁵⁸

4.9 Diagramme stratigraphique (*Harris matrix*) : voir chapitre 2, 2.3.1

Représentations graphiques connexes : diagramme PERT, méthode des potentiels métra.

4.10 Diagramme de Voronoï

Un diagramme de Voronoï est une partition de l'espace en plusieurs régions à partir d'un ensemble de points appelés sites. Pour tout site p tel que $p \in S$ et où S désigne l'ensemble des sites de l'espace étudié, on associe une région appelée *cellule de Voronoï*, qui contient les points x du plan les plus proches de ce site p que tout autre point q . Dans

⁵⁵⁸https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_spaghetti#/media/Fichier:Diagram_spaghetti_kilka_surovcow.PNG

le cas où l'espace considéré est \mathbb{R}^2 , la proximité entre un point x et un point p est mesurée par la distance euclidienne entre ces deux points par :

$$\| x - p \|$$

La cellule de Voronoï V_p qui est associée au site p est alors définie par :

$$V_p = \{x \in \mathbb{R}^2, \| x - p \| \leq \| x - q \|, q \in S\}$$

Le diagramme de Voronoï est le pavage issu de toutes ces cellules :

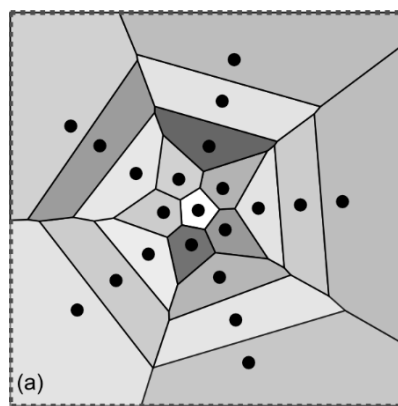


Figure 155 : Diagramme de Voronoï⁵⁵⁹

Les arêtes des cellules, telles que celles numérotées de 1 à 3 sur la figure 156, appelées *arêtes de Voronoï*, sont définies par les points à égale distance entre deux sites voisins :

⁵⁵⁹ J. Pellerin, *Prise en compte de la complexité géométrique des modèles structuraux dans des méthodes de maillage fondées sur le diagramme de Voronoï*, Thèse de doctorat en géosciences, Université de Lorraine, 2014, Figure 1.1, p. 10.

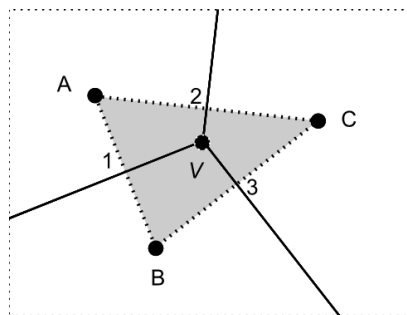


Figure 156 : Arêtes de Voronoï⁵⁶⁰

Les sommets des cellules, tels que V , appelés *sommets de Voronoï*, sont quant à eux les points à égale distance de trois sites voisins tels que A, B et C :

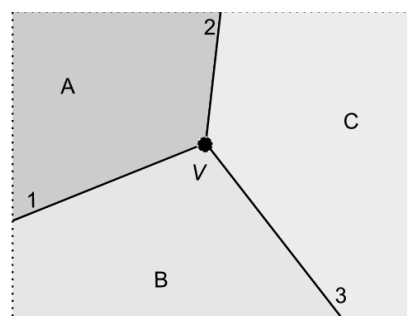


Figure 157 : Sommet de Voronoï⁵⁶¹

Le diagramme de Voronoï doit son nom au mathématicien russe Gueorgui Feodossievitch Voronoï qui a étudié le cas général en dimension n dans un article publié en 1908.

⁵⁶⁰ J. Pellerin, *Prise en compte de la complexité géométrique des modèles structuraux dans des méthodes de maillage fondées sur le diagramme de Voronoï*, *op. cit.*, Figure 1.2, p. 10.

⁵⁶¹ *Ibid.*

5. GRAPHIQUES

5.1 Chronogramme numérique (*Digital timing diagram*)

Un signal est une fonction du temps créée par un capteur pour mesurer une grandeur physique. Quand on représente un signal au cours du temps, avec le temps en abscisse et l'intensité en ordonnée, on obtient un chronogramme. Quand le signal varie de façon discrète dans le temps, il est numérique. On peut donc le représenter au moyen d'un chronogramme numérique.

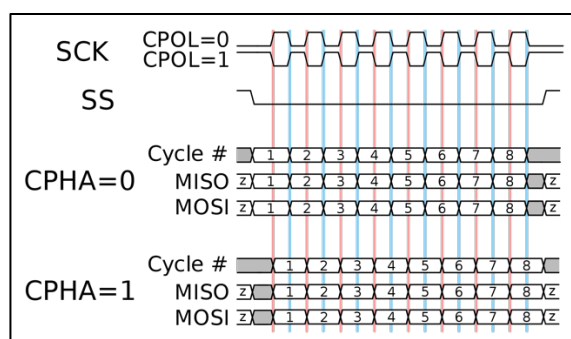


Figure 158 : Chronogramme⁵⁶² des différentes configurations d'horloge d'une liaison SPI (*Serial Peripheral Interface*)

Représentation graphique connexe : diagramme de l'œil.

5.2 Diagramme de bifurcation

L'application logistique est « l'application g_a qui à x associe $ax(1-x)$ telle que $a \in [0,4]$. Elle est définie sur l'intervalle $[0,1]$ et prend ses valeurs dans $[0,1]$ ». Comme l'ensemble de départ et l'ensemble d'arrivée sont identiques, elle peut donc être itérée, ce qui « permet de définir par récurrence la suite $(u_n)_{\mathbb{N}}$ définie par $u_0 \in [0,1]$ et $u_{n+1} = g_a(u_n)$ ⁵⁶³ ».

⁵⁶² https://fr.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/Fichier:SPI_timing_diagram.svg

⁵⁶³ A. Seigneur, *Les bifurcations de l'application logistique*, Strasbourg, Institut de Recherche Mathématique Avancée, 2012, p. 1.

Le diagramme de bifurcation rend compte du comportement de cette application en fonction du paramètre a . Lorsque $1 < a < 3$, on observe une seule branche. La suite $(u_n)_{\mathbb{N}}$ converge vers un point fixe. Lorsque $3 < a < 3,44$, on observe deux branches. On parle de comportement périodique, et on dit que l'application g_a a une orbite périodique de période 2. Quand il y a 4 branches, il y a une orbite périodique de période 4, etc. En l'étudiant, on peut remarquer que le diagramme possède la propriété étonnante d'autosimilarité. C'est une fractale, car il est auto-similaire à l'infini.

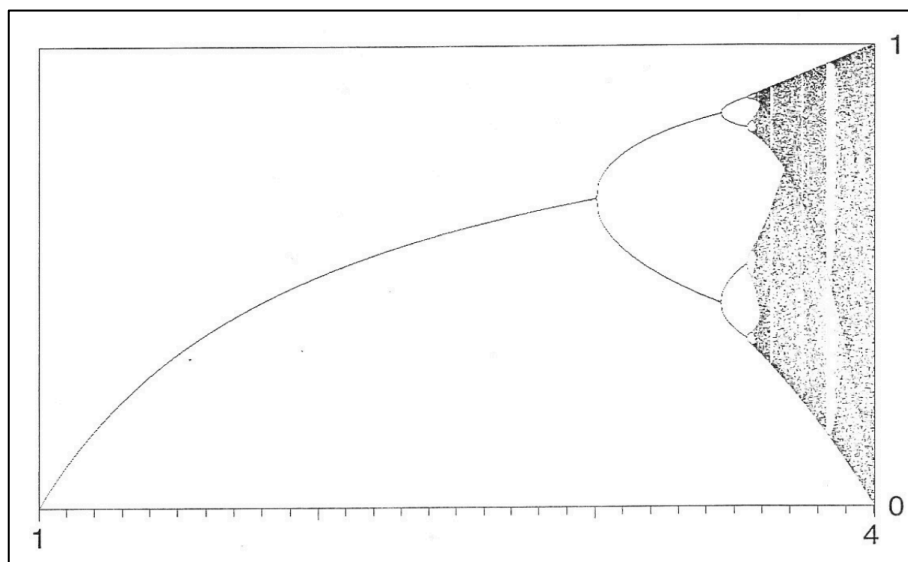


Figure 159 : Diagramme de bifurcation⁵⁶⁴

Représentation graphique connexe : figure fractale.

an5.3 Diagramme de Bode (*Bode plot*)

Le diagramme de Bode permet de caractériser un circuit en fréquence. En traitement du signal, un filtre linéaire est un système qui applique un opérateur linéaire à un signal d'entrée. Le comportement des filtres linéaires peut être décrit par une fonction de la

⁵⁶⁴ Source de la figure : A. Seigneur, *Les bifurcations de l'application logistique*, mémoire cité, p. 28.

fréquence du signal d'entrée appelée *fonction de transfert*. Le diagramme de Bode est la représentation du module (nommé gain ou amplitude) et de l'argument (nommé phase) de la fonction de transfert du système électronique étudié en fonction de la fréquence du signal d'entrée. Il permet de prédire l'effet du filtre.

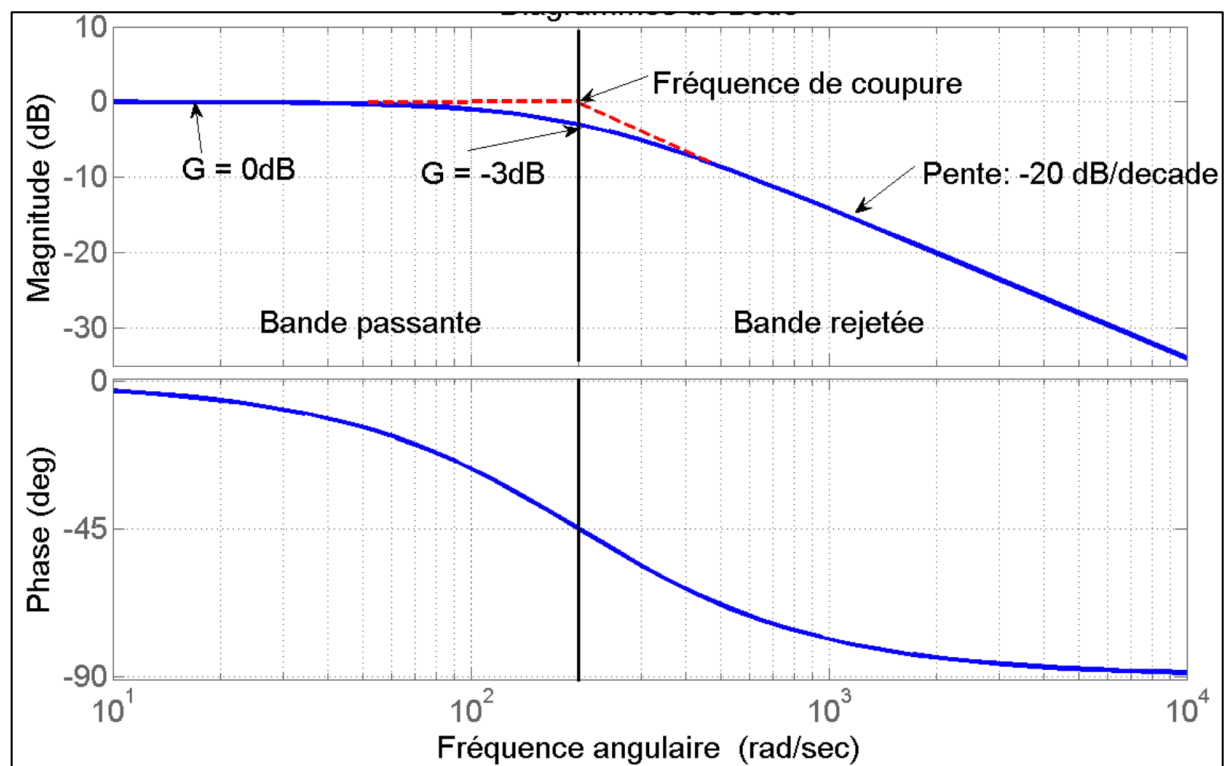


Figure 160 : Diagramme de Bode⁵⁶⁵

Représentations graphiques connexes : diagramme de Black (*Nichols diagram*), diagramme de Nyquist (*Nyquist plot* ou *Nyquist stability criterion*).

⁵⁶⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Filtre_passe-bas#/media/Fichier:FPBP1.png

5.4 Diagramme de chromaticité

En 1931, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a proposé un modèle colorimétrique qui permet de définir la couleur. Trois couleurs monochromatiques ont été choisies pour servir de références (rouge, vert et bleu). C'est par le dosage de ces trois couleurs primaires que toute couleur peut maintenant être définie de manière universelle. C'est pourquoi la représentation graphique associée à ce modèle est appelée *diagramme de chromaticité CIE 1931*. Elle permet d'obtenir une représentation bidimensionnelle d'une perception de couleur. Comme la CEI a construit cette représentation graphique en coordonnées cartésiennes, elle porte aussi le nom de *diagramme de chromaticité CIE_{xy}* :

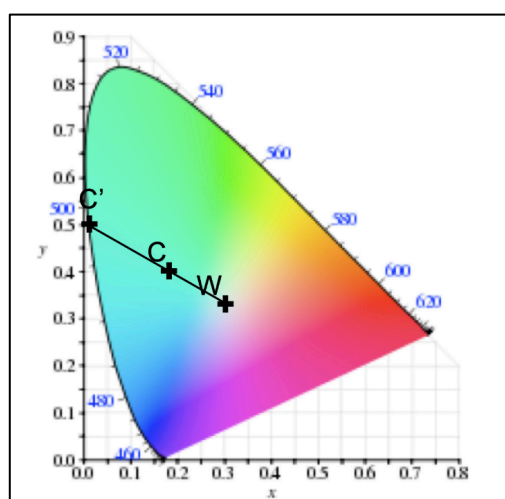


Figure 161 : Diagramme de chromaticité 1⁵⁶⁶

La saturation de la couleur appelée *degré de pureté* est notée p . Sur le diagramme ci-dessus (Figure 161), la saturation de la couleur correspondant au point C est calculée de la façon suivante :

$$p = \frac{CW}{C'W}$$

⁵⁶⁶https://cache.media.eduscol.education.fr/file/STD2A/77/2/RA19_Lycees_T_STD2A_1_PHYCHI_Autour-espaces-couleurs_1161772.pdf

avec :

- W le point associé au centre de la tache blanche de coordonnées $(0,33 ; 0,33)$;
- C' le point d'intersection entre le segment et le lieu spectral (la courbe noire) ;
- CW la distance entre le point C de coordonnées $(x_c ; y_c)$ et le point W ;
- $C'W$ la distance entre le point C' et le même point W .

La forme qui ceinture en noir le domaine des couleurs visibles est appelée *lieu spectral* (*spectrum locus*). Elle représente le spectre visible, c'est-à-dire l'ensemble des couleurs pures perceptibles par la vision humaine. La graduation numérotée le long de ce spectre donne les longueurs d'onde des couleurs pures. Les couleurs dont la longueur d'onde est supérieure à 780 nm (rayonnement infrarouge) ou inférieure à 380 nm (rayonnement ultraviolet) n'apparaissent pas sur cette courbe, car elles ne sont pas perceptibles par un œil humain (voir Figure 162) :

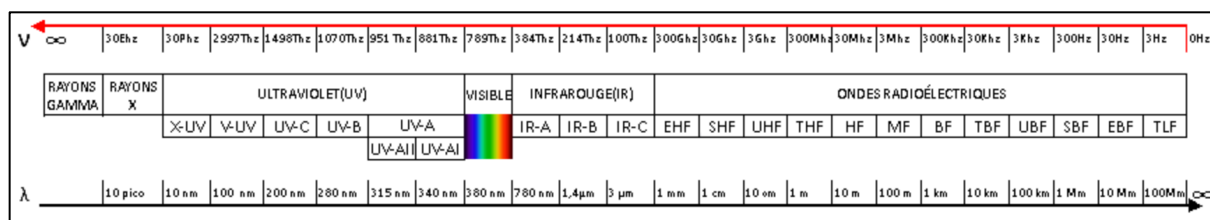


Figure 162 : Domaines du spectre électromagnétique⁵⁶⁷

Enfin les points situés dans la zone colorée du diagramme représentent les couleurs visibles non pures, c'est-à-dire celles résultant de la composition d'une couleur pure avec la couleur blanche. La zone colorée représente ainsi toutes les chromaticités visibles pour une personne moyenne et borne la gamme de la vision humaine. Le bord droit situé à la base de la zone colorée est appelé la *ligne des pourpres*. Elle est située entre le rouge de plus grande longueur d'onde et le violet de plus petite longueur d'onde, et représente

⁵⁶⁷https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique#/media/Fichier:Domaines_du_spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.png

toutes les chromaticités des mélanges du rouge pur et du violet pur. Avec le lieu spectral, elle limite les chromaticités possibles :

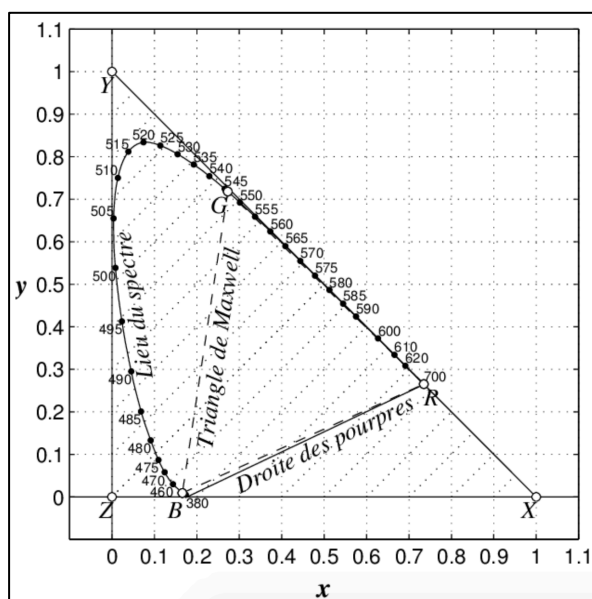


Figure 163 : Triangle de Maxwell inscrit dans le diagramme de chromaticité⁵⁶⁸

Le *triangle de Maxwell* désigne quant à lui le domaine des couleurs reproductibles par synthèse additive des trois couleurs primaires RVB (acronyme français de Rouge Vert Bleu) ou RGB (acronyme anglais de Red Green Blue). Si l'on choisit deux points de couleur sur le diagramme de chromaticité (par exemple GB), alors toutes les couleurs qui se trouvent sur la ligne droite entre les deux points peuvent être formées en mélangeant ces deux couleurs (par exemple C'). De même, toutes les couleurs qui peuvent être formées en mélangeant trois sources se trouvent à l'intérieur du triangle formé par les points sources sur le diagramme de chromaticité (par exemple BGR) :

⁵⁶⁸Source de la Figure 163 : https://www.researchgate.net/figure/Representation-du-diagramme-de-chromaticite-dans-le-planC-plan-planC_fig3_228865474

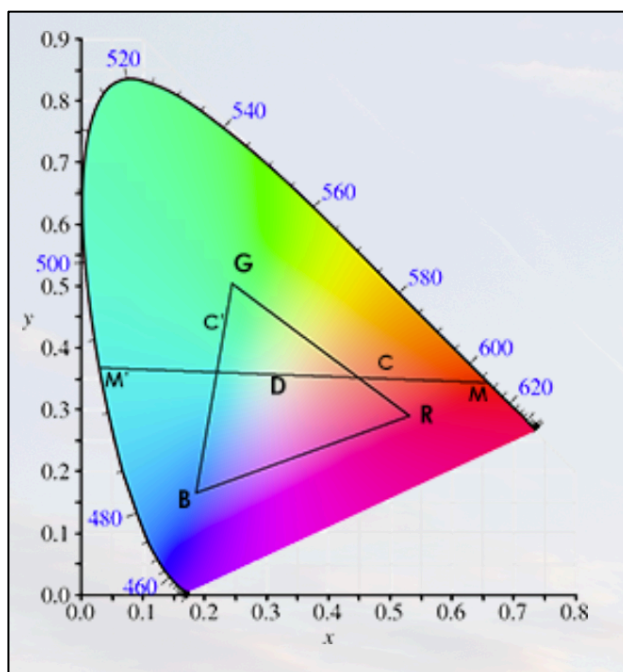


Figure 164 : Diagramme de chromaticité 2⁵⁶⁹

5.5 Diagramme de constellation

La modulation par changement de phase (dite modulation PSK pour *Phase-Shift Keying*) désigne un type de modulation numérique qui vise à transmettre de l'information binaire à travers la phase d'un signal de référence nommé *onde porteuse*. La modulation BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), la forme la plus simple de la PSK, utilise deux phases séparées de 180° . Pour cette raison, elle est aussi nommée 2-PSK. On peut lui associer un *diagramme de constellation* grâce auquel les états de phase du signal modulé sont représentés en coordonnées polaires dans le plan (I, Q) où I_k et Q_k représentent les coordonnées d'un point P_k , appelé *point de constellation* :

⁵⁶⁹<https://www.tempsdepause.ch/services/services/stages-formations/couleur/diagramme-de-chromaticite/>

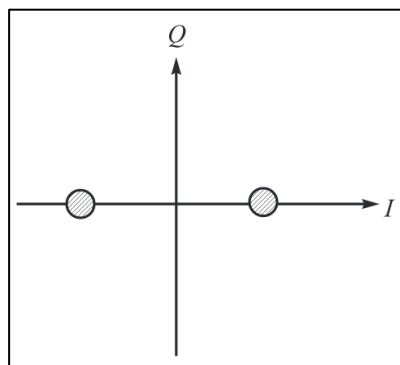


Figure 165 : Points de constellation dans le plan (I, Q)

Le diagramme de constellation permet ainsi de représenter par un point un signal modulé, puisque la norme du vecteur position $\sqrt{E_s}$ de ce point est égale à l'amplitude du signal. L'angle φ par rapport à l'axe horizontal I correspondant quant à lui à la phase du signal :

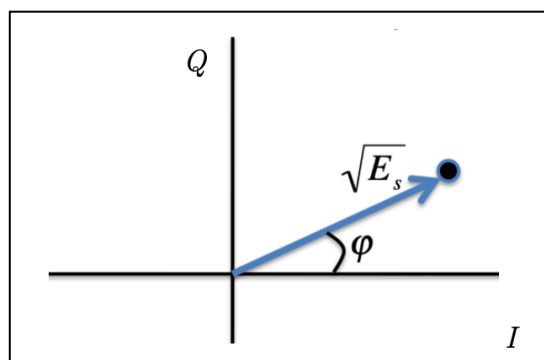


Figure 166 : Représentation d'un signal en coordonnées polaires

Représentation graphique connexe : diagramme de Fresnel.

5.6 Diagramme d'Evans (*Evans diagram*)

La corrosion désigne l'ensemble des phénomènes par lesquels un métal s'oxyde. Un électrolyte est une substance conductrice, qui peut être liquide ou solide. Si deux électrodes A et K formées de deux métaux M_1 et M_2 baignent dans une solution d'électrolyte, cet ensemble à trois éléments constitue une pile qui va débiter du courant.

Lorsque le potentiel de A et K est le potentiel moyen E_c et que le courant en jeu est le courant de corrosion I_c , la pile est en court-circuit. Le diagramme d'Evans est celui qui permet d'étudier le processus de corrosion et l'intensité du courant de corrosion.

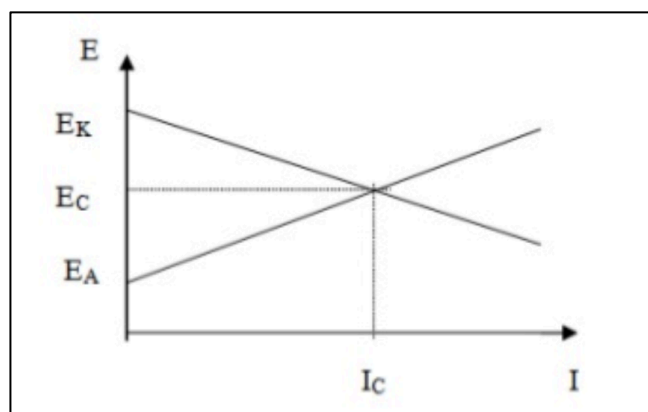


Figure 167 : Diagramme d'Evans⁵⁷⁰

Représentation graphique connexe : diagramme de Frost.

5.7 Diagramme de Fresnel (ou représentation de Fresnel)

Représentation vectorielle des grandeurs qui interviennent dans le calcul d'un circuit électrique.

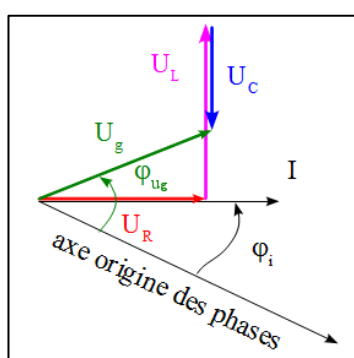


Figure 168 : Diagramme de Fresnel associé à un circuit RLC⁵⁷¹
(résistance + bobine + condensateur)

⁵⁷⁰ <https://fr.slideshare.net/habibberekia/chapitre-11-38695666>

⁵⁷¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:R_L_C_s%C3%A9rie_en_r.s.f._diagramme_de_Fresnel.png

Représentations graphiques connexes : diagramme de constellation, schéma électrique (*Circuit-diagram*), schéma unifilaire (*Single-line diagram*).

5.8 Diagramme de Frost (*Frost–Ebsworth diagram*)

Une réaction d'oxydoréduction est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons (cession ou capture) entre un oxydant et son réducteur conjugué, qu'on appelle couple rédox. Le diagramme de Frost est la représentation dans le plan, à un pH donné, des différentes espèces correspondant à différents degrés d'oxydation d'un élément. L'axe des abscisses donne le degré d'oxydation de l'élément. L'axe des ordonnées donne le potentiel standard d'un couple rédox. Le diagramme de Frost permet ainsi de déterminer les potentiels rédox qui peuvent exister entre les divers composés d'un élément chimique.

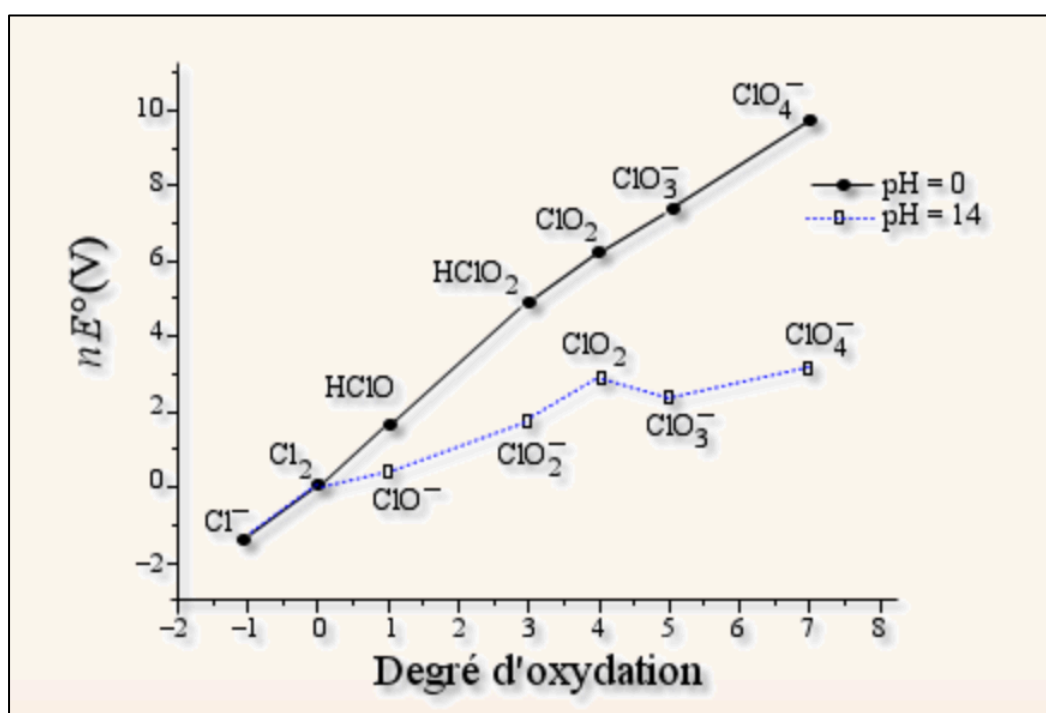


Figure 169 : Diagramme de Frost⁵⁷² du Chlore en solutions acide (pH = 0) et basique (pH = 14)

⁵⁷²<http://www.edu.upmc.fr/ucl/chimie/elementspl/apprendre/gcb.elp.fa.301.a2/content/anno1901.htm>

5.9 Diagrammes de Haigh et de Goodman

Graphiques qui permettent de définir la durée en fatigue d'un matériau avant sa rupture sous l'action de charges répétées.

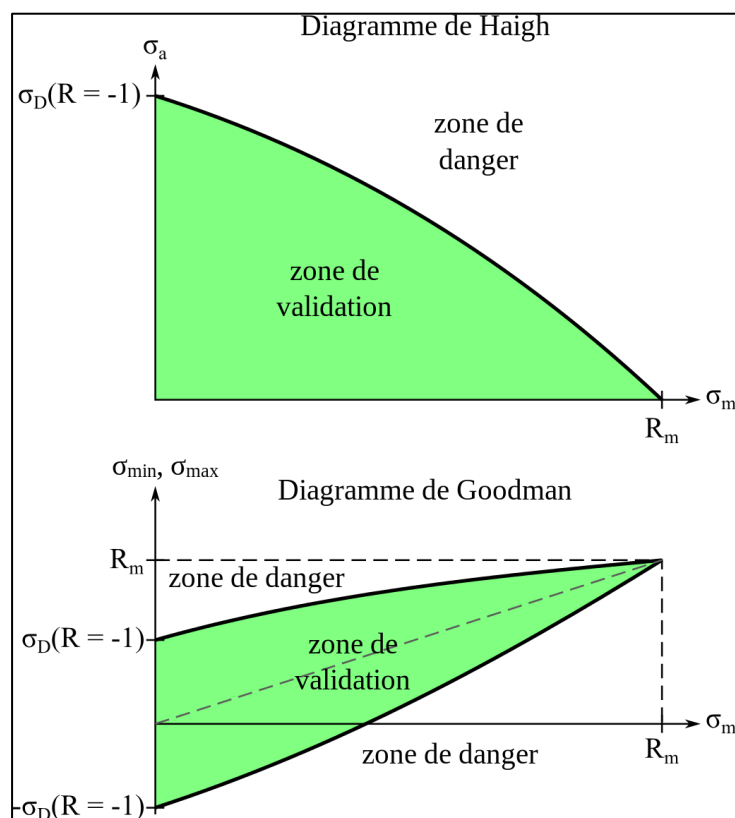


Figure 170 : Diagrammes de Haigh et Goodman⁵⁷³

Représentation graphique connexe : courbe (ou diagramme) de Wöhler.

⁵⁷³https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagrammes_de_Haigh_et_de_Goodman#/media/Fichier:Diagrammes_haigh_goodman.svg

5.10 Diagramme horaire

Graphique dans lequel le graphe $[t, s(t)]$ permet de visualiser l'évolution au cours du temps de la vitesse d'un mobile en suivant sa trajectoire.

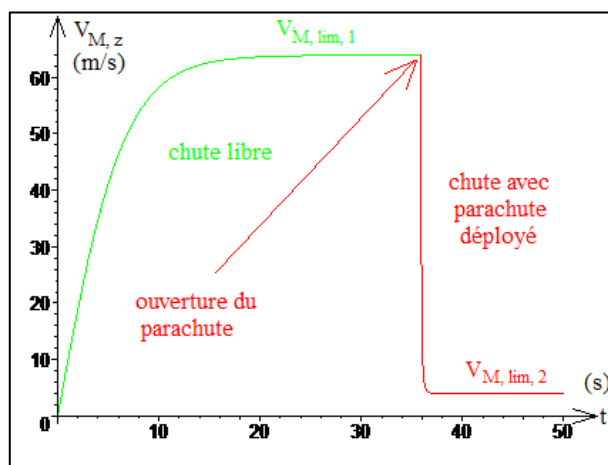


Figure 171 : Diagramme horaire de la vitesse d'un parachutiste⁵⁷⁴

⁵⁷⁴https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_horaire#/media/Fichier:Diagramme_horaire_de_vitesse_d'un_parachutiste.png

5.11 Diagramme de Jones (*Jones diagram*)

Représentation graphique utilisée en sensitométrie (*i.e.* l'étude des surfaces sensibles) qui permet de contrôler les différentes étapes de la chaîne photographique.

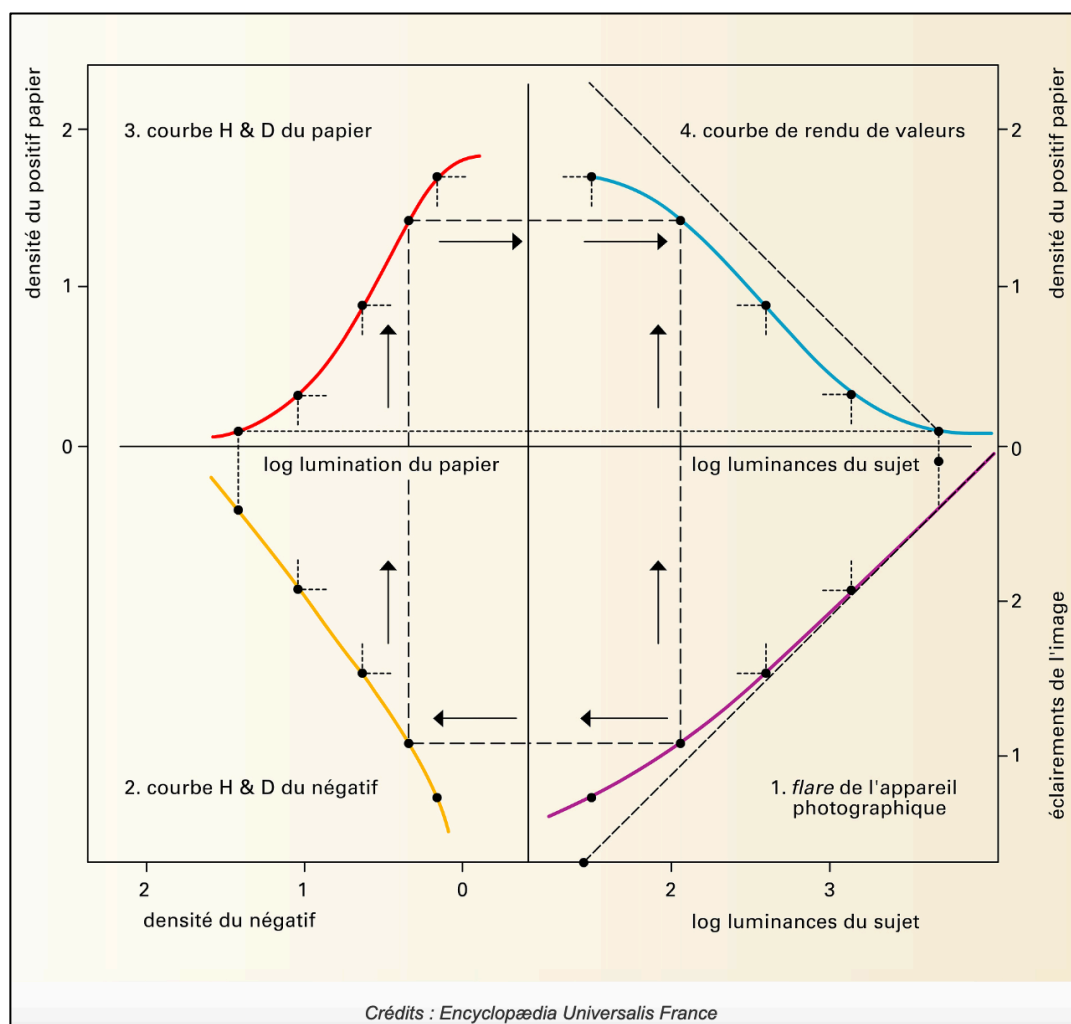


Figure 172 : Diagramme de Jones⁵⁷⁵

⁵⁷⁵ <https://www.universalis.fr/media/DE030059/>

5.12 Diagramme de Moody (*Moody chart* ou *Moody diagram*)

Graphique introduit en 1944 par Lewis Ferry Moody qui permet de calculer des pertes de charges ou de mesurer des débits de fluides dans des tuyaux.

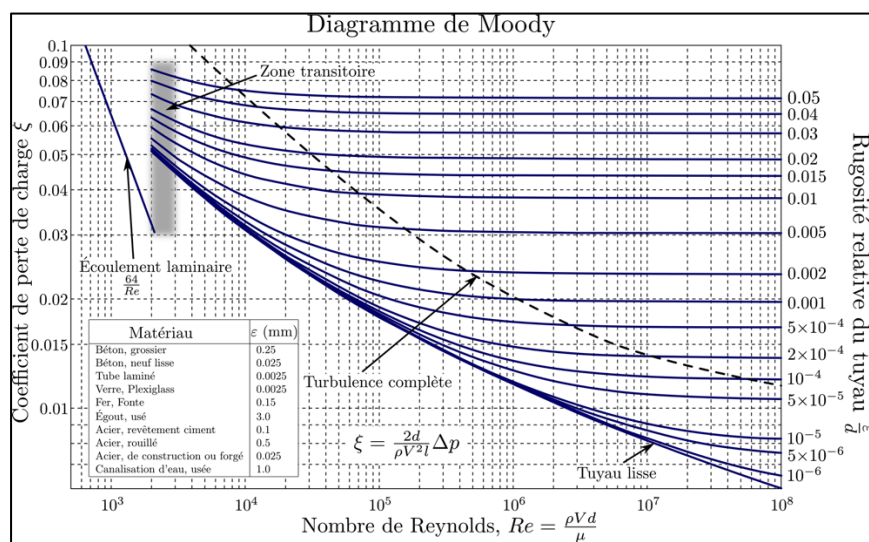


Figure 173 : Diagramme de Moody⁵⁷⁶

5.13 Diagramme de l'œil

Oscillogramme permettant d'évaluer la qualité de signaux numériques reçus avant leur démodulation par un dispositif.

⁵⁷⁶https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Moody#/media/Fichier:Moody_FR.png

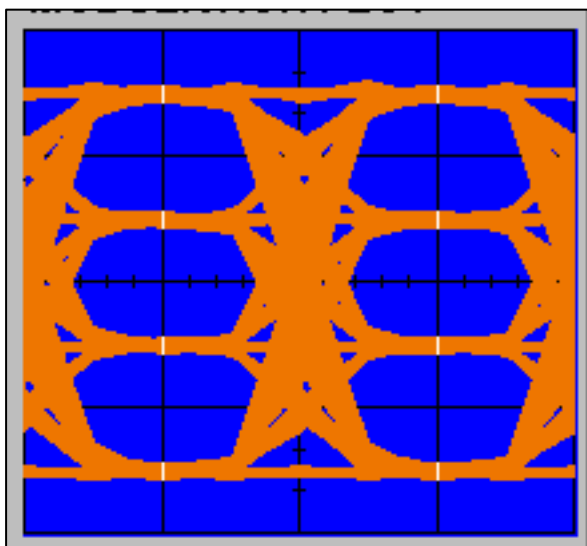


Figure 174 : Diagramme de l'œil d'un signal à quatre niveaux⁵⁷⁷

Représentation graphique connexe : diagramme de constellation.

5.14 Diagramme de Pareto : voir chapitre 4, 3.1.2

Représentation graphique connexe : diagramme d'Edgeworth.

5.15 Diagramme de Pourbaix (diagramme de potentiel-pH)

Un diagramme potentiel-pH représente, pour les différents couples rédox d'une solution, les variations du potentiel d'oxydoréduction E (en volts) en fonction du pH. Il fait apparaître les différents domaines de prédominance ou d'existence de chaque espèce. La superposition des diagrammes potentiel-pH de plusieurs éléments permet d'anticiper les réactions chimiques et leur sens d'évolution pour des concentrations initiales fixées.

⁵⁷⁷ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_1%27%C5%93il#/media/Fichier:Eye_diagram.png

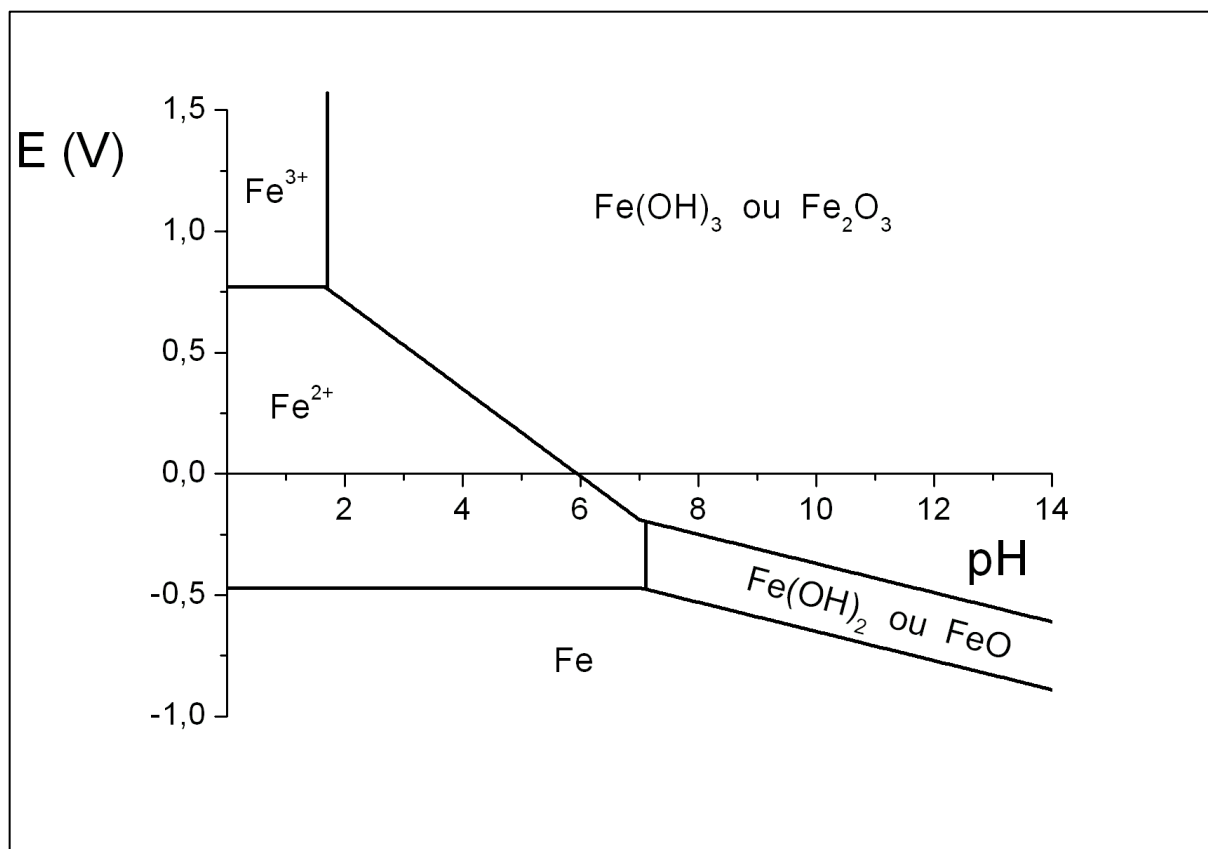


Figure 175 : Diagramme de Pourbaix du Fer⁵⁷⁸

5.16 Diagramme de Ramachandran

Les protéines sont des macromolécules présentes dans toutes les cellules vivantes. Elles sont composées de plusieurs chaînes d'acides aminés, reliés entre eux par des liaisons chimiques appelées *liaisons peptidiques*. Elles sont par ailleurs structurées suivant quatre niveaux (primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire). Dans une chaîne d'acides aminés, il existe deux degrés de liberté de rotation, identifiés par les angles φ et ψ de la figure suivante :

⁵⁷⁸ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Diagramme_potentiel_pH_du_fer.PNG

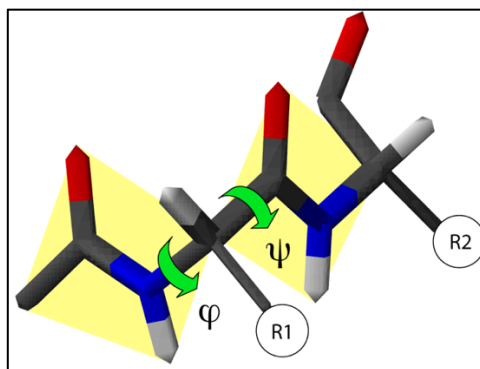


Figure 176 : Angles dièdres φ et ψ dans une chaîne d'acides aminés⁵⁷⁹

Grâce à ces angles, on peut donc déterminer la forme du squelette des protéines. En représentant les valeurs des angles φ et ψ dans un repère, Gopalasamudram Narayana Ramachandran, grâce au diagramme qui porte maintenant son nom, a réussi à montrer en 1963 qu'il existe trois zones énergétiquement favorables (rose, jaune et verte) dans lesquelles on retrouve les combinaisons d'angles φ et ψ de la majorité des acides aminés qui déterminent les structures secondaires les plus fréquentes des protéines :

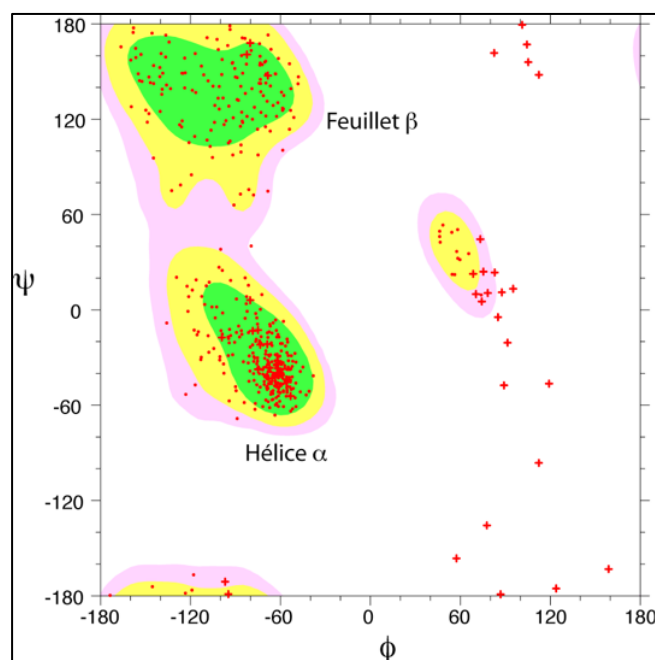


Figure 177 : Diagramme de Ramachandran d'une protéine⁵⁸⁰

⁵⁷⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_des_prot%C3%A9ines#/media/Fichier:Dihedrals.png

⁵⁸⁰ https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Ramachandran#/media/Fichier:Ramachandran.png

5.17 Diagramme de Wiggers (*Wiggers diagram*)

Graphique utilisé en physiologie cardio-vasculaire pour représenter visuellement l'essentiel des phénomènes mécaniques du cycle cardiaque.

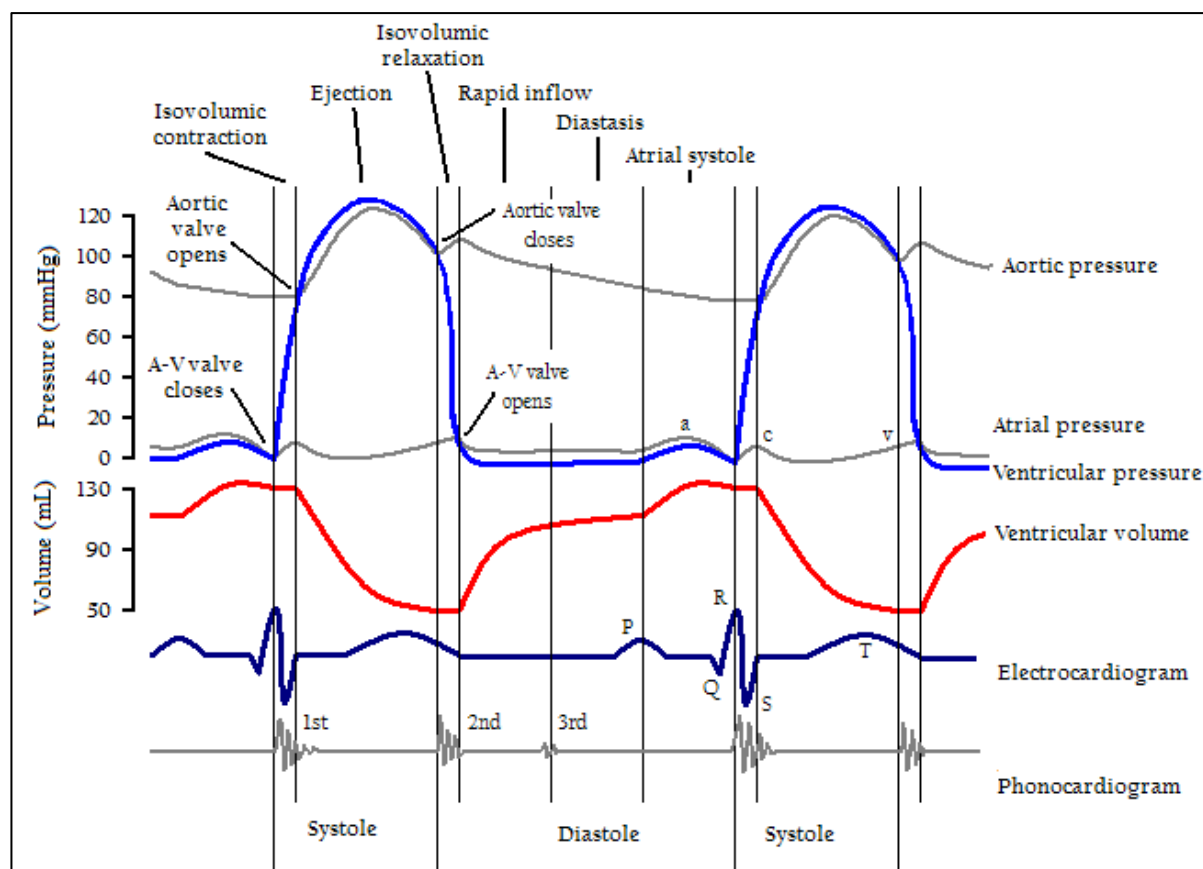


Figure 178 : Diagramme de Wiggers des événements du cycle cardiaque se produisant dans le ventricule gauche⁵⁸¹

⁵⁸¹https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Wiggers_diagram#/media/File:Wiggers_Diagram.png

6. METHODES GRAPHIQUES

6.1 Langages de modelisation graphique

6.1.1 DRAKON

DRAKON est un langage de programmation visuel d'origine russe inventé à la fin des années 1980. Sa base est constituée d'un répertoire de 27 icônes, constituant l'alphabet de DRAKON, et de 21 macro-icônes. Icônes et macro-icônes sont les blocs élémentaires au principe de la construction des diagrammes drakon, qui permettent d'écrire des algorithmes visuels.

Icon	Name of Icon	Icon	Name of Icon	Macroicon	Name of Macroicon	Macroicon	Name of Macroicon
1	Title	14	Output	1	Title with parameters	11	Switch by timer
2	End	15	Input	2	Fork	12	SIMPLE loop by timer
3	Action	16	Pause	3	Switch (number of cases $N \geq 2$)	13	SWITCH loop by timer
4	Question	17	Period	4	SIMPLE loop	14	FOR loop by timer
5	Choice	18	Start timer	5	SWITCH loop	15	WAIT loop by timer
6	Case	19	Synchronizer	6	FOR loop	16	Insertion by timer
7	Headline	20	Realtime parallel process	7	WAIT loop	17	Output by timer
8	Address	21	Comment	8	Action by timer	18	Input by timer
9	Insertion	22	Right comment	9	Shelf by timer	19	Start timer by timer
10	Shelf	23	Left comment	10	Fork by timer	20	Parallel process by timer
11	Formal parameters	24	Loop arrow			21	TREE loop
12	Begin of FOR loop	25	Silhouette arrow				
13	End of FOR loop	26	Connector				
		27	Concurrent process				

Figure 179 : Icônes⁵⁸² et macro-icônes⁵⁸³ du langage DRAKON

⁵⁸²https://fr.wikipedia.org/wiki/DRAKON#/media/Fichier:Icons_of_Visual_Programming_Language_--DRAKON--.png

⁵⁸³https://fr.wikipedia.org/wiki/DRAKON#/media/Fichier:Macroicons_of_Visual_Programming_Language_DRAKON.png

Par exemple, voici l'algorithme commandant les opérations à effectuer en cas de sortie d'un appartement dans l'éventualité d'être confronté à une averse ou à une pluie. Il mobilise les catégories d'icônes 1, 4, 3 et 2, c'est-à-dire un titre, une question, trois actions et une fin. L'ordre hiérarchique des données du problème exprimées en langage naturel conduisant à la construction de l'algorithme est en effet le suivant :

1. Quel est le but poursuivi ? Réponse : sortir de l'appartement. D'où un titre d'algorithme : « Sortir de l'appartement ». Il faut donc commencer par choisir une icône de type 1 (« Title »).

2. Pourquoi se vêtir ? Réponse : car il peut faire froid. Donc la première action est : « Se vêtir ». Il faut donc choisir une icône de type 3 (« Action »).

3. Est-on protégé d'une averse même si l'on est certain que l'on n'aura pas froid en sortant de l'appartement vêtu d'un manteau sans capuche ? Il faut donc prendre un parapluie au cas où il pleuve. Donc la seconde action est : « Prendre un parapluie s'il pleut » ou « Ne pas prendre de parapluie s'il ne pleut pas ». Un embranchement est nécessaire, car la réponse à la question est « oui » ou « non ».

4. Ce qui suppose de se poser la question suivante : « Est-ce qu'il pleut ? ». Une fois qu'on a répondu à la question on peut passer à la troisième action. Il faut donc choisir une icône de type 4 (« Question »).

5. La troisième action étant : « Sortir de l'appartement ». Il faut donc reprendre une icône de type 3, pour représenter l'action « Prendre un parapluie » en cas d'averse.

6. Une fois sorti de l'appartement, l'algorithme est terminé, nous sommes dehors avec ou sans parapluie en fonction du temps qu'il fait effectivement. Il faut donc choisir une icône de type 2 (« End »).

Ainsi, l'algorithme drakon de sortie d'un appartement est le suivant :

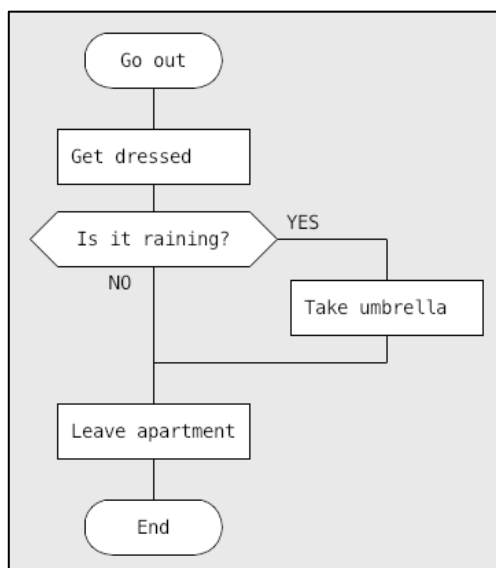


Figure 180 : Algorithme drakon de sortie d'appartement⁵⁸⁴

Représentation graphique connexe : structogramme ou graphe NSD (*Nassi-Shneiderman diagram*)

6.1.2 UML (*Unified Modeling Language*)

UML est un langage de modélisation graphique normalisé utilisé en génie logiciel. La version actuelle de 2021, la 2.5.1, propose 14 types de diagrammes répartis en deux grandes classes : les diagrammes de structure (*structure diagrams*) et les diagrammes de comportement (*behavior diagrams*). On distingue ainsi sept types de diagrammes de structure et sept types de diagrammes de comportement :

- diagrammes de structure : diagramme de classe (*class diagram*), diagramme d'objet (*object diagram*), diagramme de composants (*component diagram*), diagramme de déploiement (*deployment diagram*), diagramme de paquet ou de paquetage (*package diagram*), diagramme de structure composite (*composite structure diagram*), diagramme de profil (*profil diagram*) ;

- diagrammes de comportement : diagramme de cas d'utilisation (*use-case diagram*), diagramme état-transition (*state machine diagram*), diagramme d'activité

⁵⁸⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/DRAKON#/media/Fichier:Going_out_in_DRAKON.png

(*activity diagram*), diagramme de séquence (*sequence diagram*), diagramme de communication (*communication diagram*), diagramme global d'interaction (*interaction overview diagram*), diagramme de temps (*timing diagram*).

6.2 Méthodes planificatrices

6.2.1 Diagramme de cycle (simogramme)

Le simogramme est un outil de représentation graphique du cycle de travail de plusieurs ressources (opérateur seul, machine seule, opérateur sur une machine, robot, etc.) dans le cadre d'une activité industrielle de production en série. Il est composé de deux axes : le premier, vertical, qui peut se lire de haut en bas, sur lequel sont ordonnés les différents postes de production ; le second, horizontal, défini suivant une unité de mesure temporelle. Il se lit de haut en bas et de gauche à droite. Prenons l'exemple⁵⁸⁵ d'une ZAP (Zone d'Assemblage de Production). Les postes sont représentés par des trains composés de compartiments. Chaque train représente la durée d'un cycle de production sur un poste de travail. L'unité de mesure du temps de travail prise en compte dans l'exemple présenté est le Dmh (Dix-millième d'heure). Chaque compartiment représente une tâche répétitive effectuée au cours d'un cycle. Dans le diagramme suivant, on remarque que le Poste 1 représente un goulot d'étranglement. Le temps du cycle de ce poste est élevé comparativement à ceux des Postes 2 et 3. En déplaçant la tâche E du Poste 1 au début du cycle du Poste 2 puis la tâche F du Poste 2 au début du cycle du Poste 3, on peut produire un rééquilibrage de la production horaire de la ZAP :

⁵⁸⁵ Exemple tiré de : R. Tajini & S. Lissane Elhaq, « Méthodologie de mesure du travail dans l'industrie du câblage », *Conférence Internationale Conception et Production Intégrées*, vol. 7, n° 1, p. 79-80.

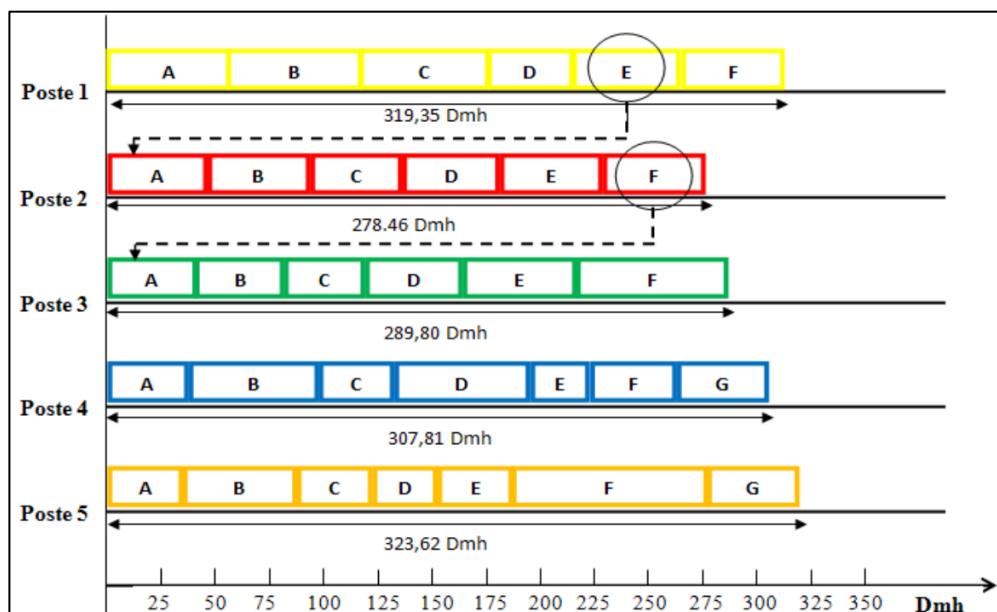


Figure 181 : Diagramme de cycle d'une Zone d'Assemblage de Production⁵⁸⁶

Après une redistribution des tâches en vue d'un équilibrage, on obtient le diagramme de cycle suivant :

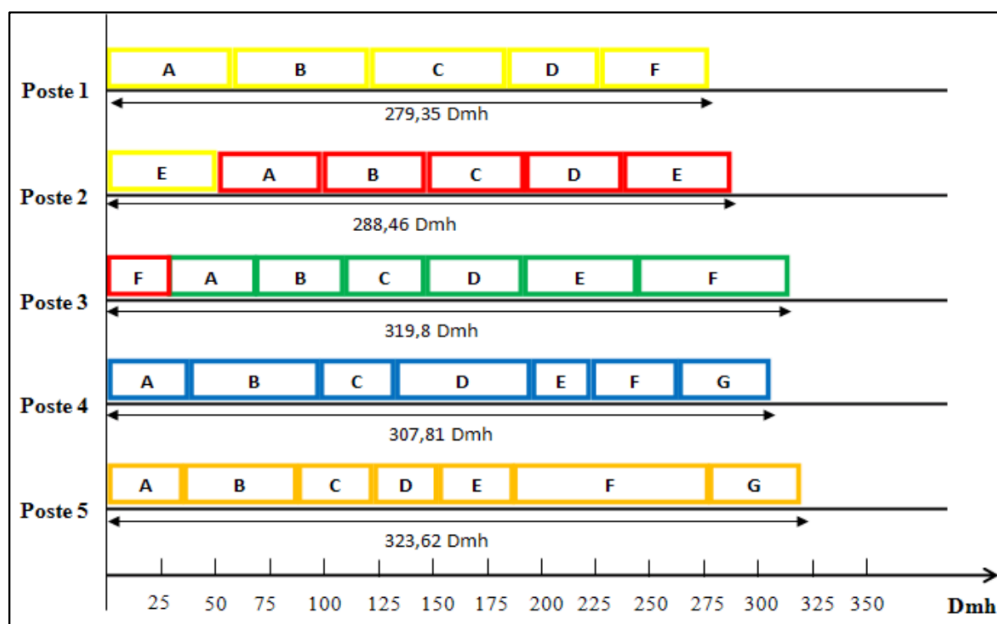


Figure 182 : Diagramme de cycle après rééquilibrage⁵⁸⁷

⁵⁸⁶https://www.researchgate.net/publication/278032038_Methodologie_de_mesure_du_travail_dans_l%27industrie_du_cablage_Etude_de_cas_industriel (Figure 7, p. 14)

⁵⁸⁷https://www.researchgate.net/publication/278032038_Methodologie_de_mesure_du_travail_dans_l%27industrie_du_cablage_Etude_de_cas_industriel (Figure 8, p. 15)

Cet exemple permet de constater que le diagramme de cycle est un outil graphique efficace grâce auquel il est possible d'améliorer les performances d'un système de production.

Représentations graphiques connexes : diagramme de Gantt, diagramme PERT.

6.2.2 Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa est un outil graphique qui a été inventé dans les années 1940 par Kaoru Ishikawa, un ingénieur chimiste japonais, pour permettre à des ingénieurs d'améliorer la qualité de leur travail en équipe. Il consiste à mettre en évidence toutes les causes possibles d'un problème. À partir d'un effet connu, quelles sont les grandes catégories de causes que l'on peut identifier ? Il en existe cinq désignées par l'acronyme 5M :

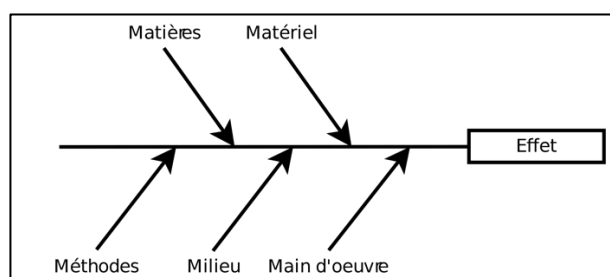


Figure 183 : Diagramme d'Ishikawa 5M⁵⁸⁸

Le point de départ de la construction du diagramme consiste en un brainstorming lors d'un travail d'équipe. Pour commencer à construire un tel diagramme, il faut noter l'effet à partir duquel on souhaite réfléchir, sur la droite d'un support graphique. Le brainstorming est l'étape pendant laquelle on liste les hypothèses et les idées concernant les causes de l'effet étudié. Son objectif est de ranger toutes les hypothèses et idées

⁵⁸⁸https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_causes_et_effets#/media/Fichier:Qualite-diagramme-causes-effets-ishikawa-vector.svg

énoncées dans les bonnes catégories. Le diagramme peut être aussi dit 7M lorsqu'on lui ajoute les deux nouvelles catégories Mesure et Management :

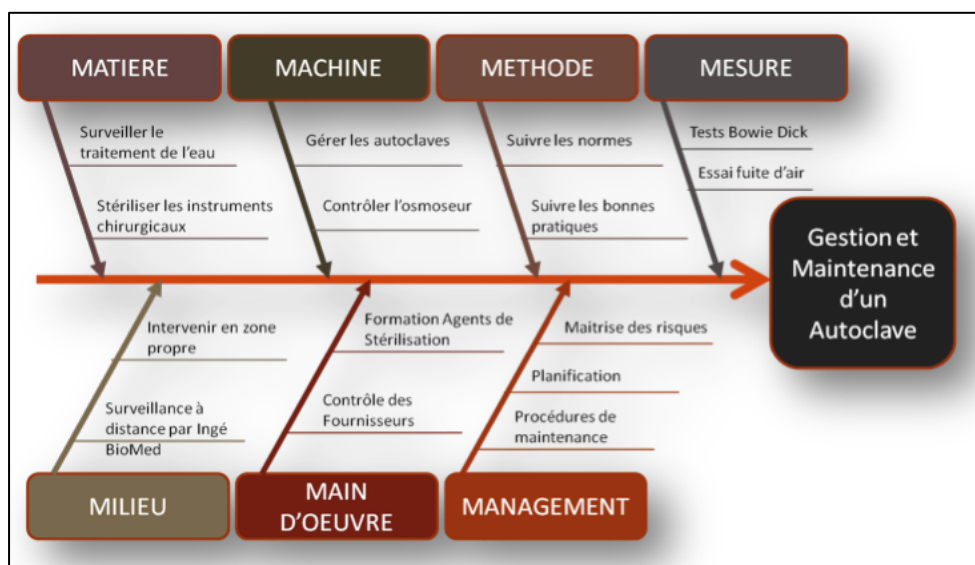


Figure 184 : Diagramme d'Ishikawa 7M⁵⁸⁹

Représentations graphiques connexes : méthode KJ ou diagramme des affinités (*KJ Method, Affinity diagram*).

6.3 Mode d'emploi

6.3.1 L'exemple du mode d'emploi d'un autocuiseur : voir chapitre 5, 4.2

6.4 Systèmes de notation

6.4.1 Cinétographie Laban : voir chapitre 5, 4.1

Représentations graphiques connexes : diagramme d'accord (de guitare), diagramme de jonglerie, diagramme de tricot, notation *Siteswap*.

⁵⁸⁹<http://leanmanufacturing.com/ishikawa/>

6.4.2 Diagramme de Coxeter : voir chapitre 4, 4.3

Représentations graphiques connexes : diagramme de Dynkin, diagramme de Schlegel.

6.4.3 Diagramme de Dynkin : voir chapitre 4, 4.3

Représentation graphique connexe : diagramme de Coxeter.

6.4.4 Diagramme de nœud

La théorie des nœuds est une branche de la topologie qui a pour objet d'étude des courbes fermées entrelacées avec elles-mêmes appelées nœuds. Au sens mathématique du terme, un nœud est une courbe simple fermée dans l'espace de dimension 3. Le diagramme d'un nœud est la projection du nœud sur un plan, tel qu'il fait apparaître le point de croisement entre deux ficelles en précisant laquelle des deux passe au-dessus. Un diagramme de nœud est donc la réunion de ficelles dans l'espace de dimension 2 qui est interprétée comme une courbe fermée dans l'espace de dimension 3. Deux diagrammes sont dits *isotopes* si on peut les transformer l'un en l'autre par une série de déformations continues. Ces opérations de déformations, dites *mouvements de Reidemeister*, sont classifiées en trois types : tordre ou détordre un brin (type 1) ; déplacer une boucle sur une autre (type 2) ; déplacer un brin au-dessus ou au-dessous d'un croisement (type 3). Le théorème de Reidemeister dit la chose suivante : « *Deux diagrammes représentent le même nœud si et seulement s'ils peuvent être transformés en deux diagrammes isotopes par une séquence finie de mouvements de Reidemeister de type 1, 2 ou 3* ». Ce théorème a été démontré indépendamment par James Waddell Alexander et Garland Baird Briggs dans un article publié en 1926 et par Kurt Reidemeister dans un autre article publié en 1927. Comme les diagrammes de nœuds procurent une puissance de calcul, ils sont admis comme constituant un type de notation jugée bonne et efficace pour inciter l'inférence dans cette branche des mathématiques qu'est la théorie des nœuds.

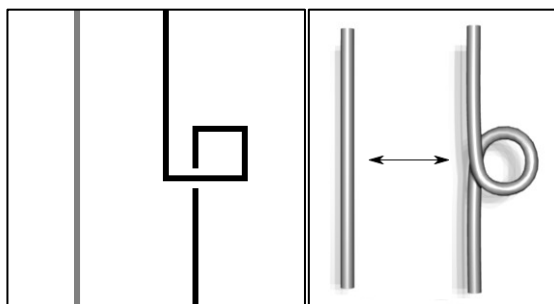


Figure 185 : Diagramme et nœud associé de Type I⁵⁹⁰

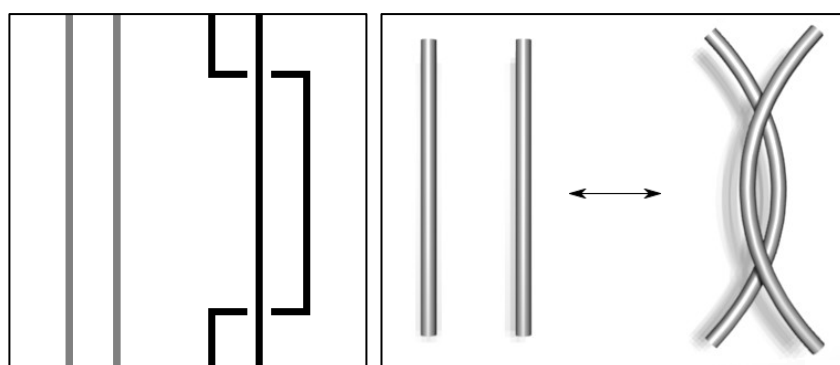


Figure 186 : Diagramme et nœud associé de Type II⁵⁹¹

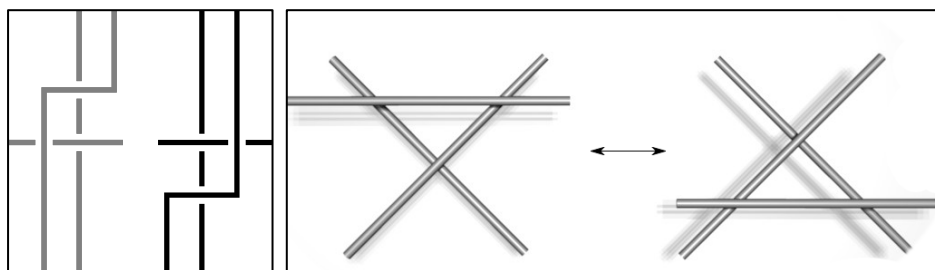


Figure 187 : Diagramme et nœud associé de Type III⁵⁹²

⁵⁹⁰https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_d%27un_n%C5%93ud,_d%27un_entrelacs#/media/Fichier:Reidemeister_move_1.svg; [https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_\(mathematics\)#/media/File:Reidemeister_move_1.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_(mathematics)#/media/File:Reidemeister_move_1.png)

⁵⁹¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_d%27un_n%C5%93ud,_d%27un_entrelacs#/media/Fichier:Reidemeister_move_2.svg; [https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_\(mathematics\)#/media/File:Reidemeister_move_2.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_(mathematics)#/media/File:Reidemeister_move_2.png)

⁵⁹²https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_d%27un_n%C5%93ud,_d%27un_entrelacs#/media/Fichier:Reidemeister_move_3.svg; [https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_\(mathematics\)#/media/File:Reidemeister_move_3.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Knot_(mathematics)#/media/File:Reidemeister_move_3.png)

Représentations graphiques connexes : diagramme de Carroll, diagramme d'Euler, diagramme de Venn, graphe existentiel, *Spider diagram*.

7. DIAGRAMMES

7.1 Abaque de Smith (*Smith chart* en anglais et *Smith-Diagramm* en allemand) : voir chapitre 6, 1.1

7.2 Diagramme de boucle causale (*Causal loop diagram*)

Un diagramme de boucle causale est une représentation infographique statique ou dynamique permettant de comprendre et d'analyser le fonctionnement et l'évolution d'un système à plusieurs variables. Il aide à identifier les variables fondamentales en jeu et à montrer leurs relations de cause à effet. Quatre éléments sont à la base d'un tel diagramme : les variables, leurs liens, le signe sur les liens (positif ou négatif) et le signe de la boucle (positif ou négatif) :

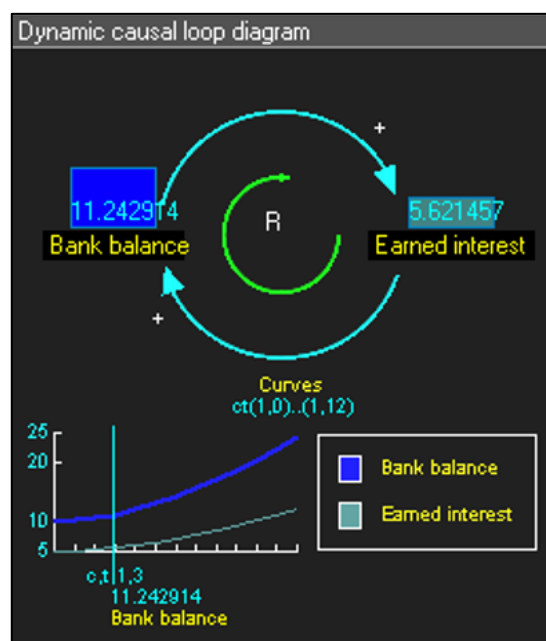


Figure 188 : Diagramme de boucle causale montrant une rétroaction de renforcement entre un solde bancaire et des intérêts perçus⁵⁹³

⁵⁹³ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/CLD_positive_ANI.gif

Les diagrammes de boucles causales ont été proposés pour la première fois en 1963 par Magoroh Maruyama. Ils permettent de montrer quel élément d'un système dynamique complexe provoque le changement d'un ou plusieurs autres de ses éléments.

7.3 Diagramme de Carroll

Les diagrammes de Carroll correspondent à une variante graphique des diagrammes de Venn. Ils consistent à représenter des propositions au moyen de cellules de formes carrées pour résoudre des syllogismes. Le « diagramme bilittéral » est le dispositif graphique proposé par Carroll pour représenter la situation dans laquelle des objets peuvent ou ne peuvent pas avoir deux propriétés :

x y	x $non-y$
$non-x$ y	$non-x$ $non-y$

Figure 189 : Structure générale d'un diagramme bilittéral⁵⁹⁴

Si on considère un ensemble de choses tels que des gâteaux, on peut leur attribuer deux propriétés : par exemple « Frais » et « Bon ». Cela signifie qu'un gâteau peut être frais, ou bon, ou ni l'un ni l'autre, ou les deux. Si x et y désignent les classes « Gâteaux frais » et « Gâteaux bons », alors dans un diagramme bilittéral, la ligne supérieure des cellules se rapporte à la classe x tandis que la ligne inférieure se rapporte à la classe $non-x$ ou x' (« Gâteaux qui ne sont pas frais »). De même, les deux cellules de gauche se rapportent à la classe y (« Gâteaux bons ») tandis que les deux cellules de droite se rapportent à la classe $non-y$ ou y' (« Gâteaux qui ne sont pas bons »). La

⁵⁹⁴ Source de la Figure 189 : <https://journals.openedition.org/cps/docannexe/image/2798/img-2.png>

présence d'une propriété est désignée par un marqueur de couleur rouge ; son absence par un marqueur de couleur grise. Le fait de placer un marqueur rouge dans la cellule « xy » indique que « xy existe ». Par conséquent cela signifie que « Certains x sont y » et que « Certains y sont x » sont également vrais. De même, un marqueur rouge dans la cellule « xy' » signifie que « xy' existe », ou « Certains x sont y' », ou « Certains y' sont x ». En d'autres termes, cela signifie : « Il existe des gâteaux frais qui ne sont pas bons », ou « Certains gâteaux frais ne sont pas bons », et enfin, « Certains gâteaux qui ne sont pas bons sont frais ». Un marqueur gris dans la cellule « xy » signifie « Il n'existe pas de xy », ce qui signifie que « Aucun x n'est y » mais aussi que « Aucun y n'est x ». Les conventions interprétatives sont les suivantes :

- x : désigne la classe des gâteaux frais ;
- $non-x = x'$: désigne la classe des gâteaux qui ne sont pas frais ;
- y : désigne la classe des gâteaux bons ;
- $non-y = y'$: désigne la classe des gâteaux qui ne sont pas bons.

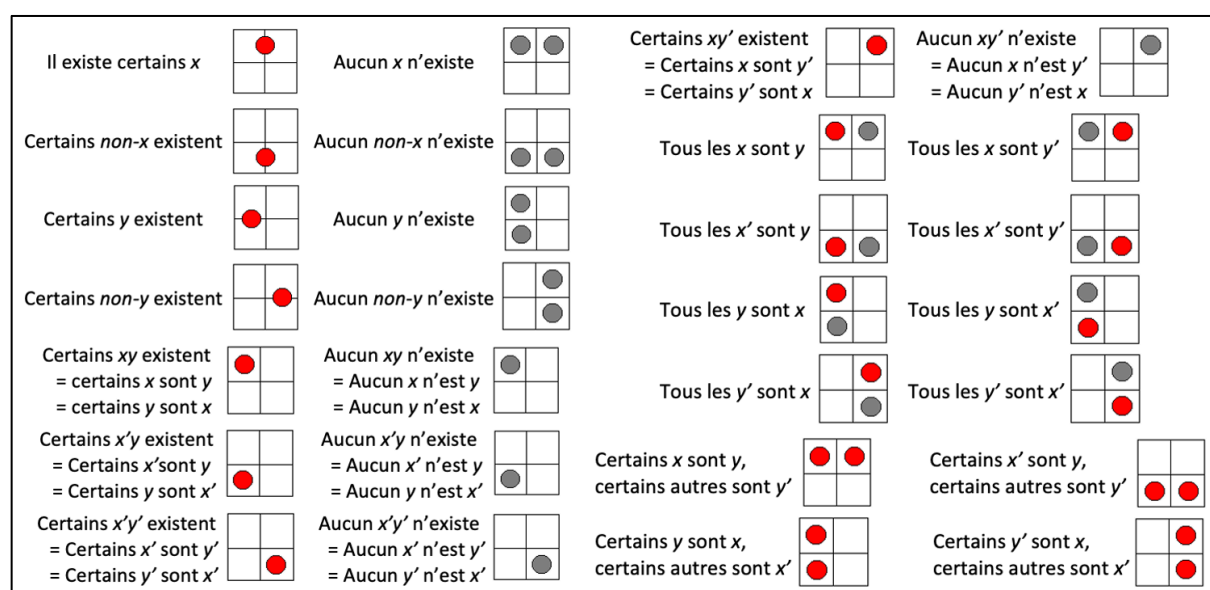


Figure 190 : Série des diagrammes bilittéraux associés à quatre classes d'attribution

Carroll introduit à l'intérieur du carré global (qui représente l'univers du discours) un second carré, dont l'intérieur correspond à une nouvelle classe d'attribution m et

l'extérieur à sa négation (*non-m*). Cela permet de représenter le moyen terme du raisonnement et d'obtenir un diagramme dit « trilittéral » grâce auquel on peut exprimer la prémisse d'un syllogisme :

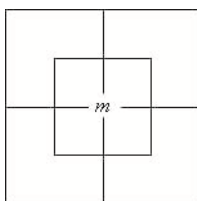


Figure 191 : Diagramme trilittéral⁵⁹⁵

Or comme on sait que :

<i>x</i> <i>y</i>	<i>x</i> <i>non-y</i>
<i>non-x</i> <i>y</i>	<i>non-x</i> <i>non-y</i>

Les deux conditions/conventions interprétatives suivantes doivent être respectées⁵⁹⁶ :

- 1° si au moins un des deux compartiments d'une cellule du diagramme trilittéral contient la lettre I indiquant qu'il est occupé, alors la cellule correspondante du diagramme bilittéral doit aussi être signalée avec une lettre I pour signifier qu'elle est occupée ;

- 2° si les deux compartiments d'une cellule du diagramme trilittéral contiennent la lettre O indiquant qu'ils sont vides, alors la cellule correspondante du diagramme bilittéral doit aussi être signalée avec une lettre O pour signifier qu'elle est vide.

Dans ce cadre interprétatif, le diagramme de Carroll est l'outil graphique grâce auquel on peut résoudre les syllogismes en y représentant les deux prémisses par deux diagrammes « trilittéraux » auxquels on applique les deux règles de

⁵⁹⁵ Source de la Figure 191 : <https://journals.openedition.org/cps/docannexe/image/2798/img-2.png>

⁵⁹⁶ A. Moktefi, « La théorie syllogistique de Lewis Carroll », *Les Cahiers philosophiques de Strasbourg*, 28 | 2010, p. 214.

transformation énoncées ci-dessus : « Tous les x sont m » (diagramme trilittéral situé à gauche de la Figure 192) et « Tous les m sont y » (diagramme trilittéral situé au centre de la Figure 192). Cela permet de générer le diagramme bilittéral (situé à droite de la Figure 192) qui représente la conclusion du syllogisme (« Tous les x sont y ») :

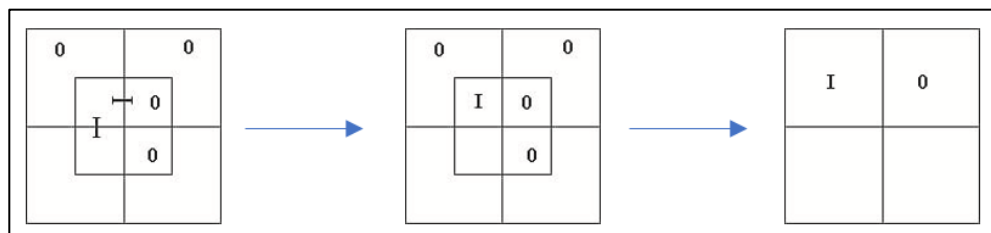


Figure 192 : Représentation de la conclusion d'un syllogisme au moyen d'un diagramme bilittéral⁵⁹⁷

Représentations graphiques connexes : diagramme de Venn, diagramme d'Euler, graphe existentiel, *spider diagram*.

7.4 Diagramme de Clapeyron : voir chapitre 6, 3.1

7.5 Diagramme de Darwin : voir chapitre 6, 4.0

7.6 Diagramme de Davenport : voir chapitre 6, 1.2

7.7 Diagramme d'Ellingham : voir chapitre 5, 2.2

7.8 Diagramme enthalpique : voir chapitre 6, 3.2

7.9 Diagramme de (Bruno) de Finetti : voir chapitre 5, 1.2

7.10 Diagramme de Feynman : voir chapitre 6, 2.1

7.11 Diagramme floral

Le diagramme floral est une représentation de la fleur en coupe transversale au moyen d'un schéma conventionnel. Il a été introduit pour la première fois en 1916 par John Henry Schaffner dans un article intitulé « A General System of Floral Diagrams ». Il s'agit d'une projection des fleurs, coupées transversalement, sur un plan horizontal. Les pièces florales sont disposées en couronnes qu'on appelle les verticilles. Ces couronnes

⁵⁹⁷ Source de la Figure 192 : <https://journals.openedition.org/cps/docannexe/image/2798/img-4.png>

sont au nombre de quatre : la plus externe représente celle qui est à l'extérieur de la fleur. L'orientation centripète sur le schéma concentrique permet de se diriger vers l'intérieur de la fleur. Le premier verticille (V1) est nommé le *calice* : il désigne l'ensemble des sépales. Le deuxième verticille (V2) est nommé la *corolle* : il désigne l'ensemble des pétales. Le troisième verticille (V3) est nommé l'*androcée* : il désigne l'ensemble des étamines. Le dernier verticille (V4), celui qui est le plus au centre du diagramme, est nommé le *gynécée*, et désigne l'ensemble des carpelles. Voici par exemple le diagramme floral de l'Arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) :

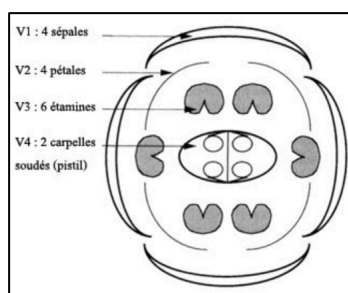


Figure 193 : Diagramme floral de l'Arabette des dames⁵⁹⁸

On peut aussi schématiser la relation du matériel végétal d'une fleur à son diagramme floral. Dans le cas de la Campanule carillon (*Campanula medium*), cela donne le schéma suivant :

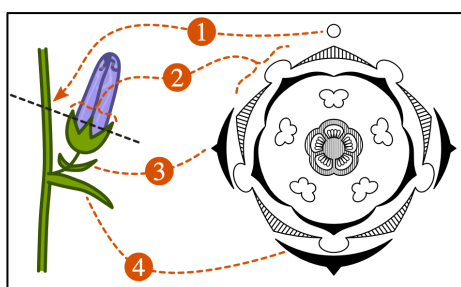


Figure 194 : Représentation de la relation du matériel végétal de la Campanule carillon à son diagramme floral⁵⁹⁹

⁵⁹⁸ http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/dyna/dossiers-thematiques/morphogenese-vegetale/ressources/morphogenese-vegetale/developpement-de-la-fleur-modele-abc/images-1/digramme%20A%20copy.jpg/image_view_fullscreen

⁵⁹⁹ https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Floral_diagram_and_plant_material.svg

La ligne pointillée en noir montre la coupe transversale. Le chiffre 1 représente la position de l'axe principal par rapport à la fleur ; le chiffre 2 représente la coupe transversale à travers la fleur latérale ; le chiffre 3 représente la coupe de la bractéole ; le chiffre 4, la coupe de la bractée. Les quatre étapes de la construction du diagramme floral sont les suivantes :

- étape 1 : tracer les quatre verticilles ;
- étape 2 : détacher les pièces florales les plus externes (les sépales) ;
- étape 3 : schématiser les pièces florales sur le premier verticille ;
- étape 4 : répéter les étapes 2 et 3 avec les autres pièces florales en faisant attention à changer de verticille à chaque changement de pièces florales.

7.12 Diagramme de Jablonski

Le diagramme de Jablonski permet de représenter les transitions énergétiques induites par l'exposition d'une molécule à la lumière. C'est un diagramme énergétique, organisé suivant un axe vertical (E) et des colonnes. Dans une colonne, les lignes horizontales représentent les états propres de la molécule étudiée (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5). Celles qui sont en gras représentent les limites des états d'énergie électronique (S_0, S_1, S_2, S_3, T_1). Grâce à l'utilisation de flèches rectilignes et ondulées, les diagrammes schématisent « les transitions entre les états propres qui se produisent lors de l'exposition d'une molécule à une longueur d'onde particulière de la lumière⁶⁰⁰ ». Les flèches rectilignes montrent la conversion qui s'opère entre un photon de lumière et l'énergie d'un électron suite à leur interaction. Un électron peut accepter puis dissiper l'énergie qu'il a capté d'un photon d'une longueur d'onde particulière de plusieurs façons. La première transition représentée par ce type de diagramme est l'*absorption* d'un photon d'une énergie particulière par la molécule étudiée. Elle est indiquée par la flèche rectiligne de couleur violette pointant vers le haut (voir Figure 195). Il s'agit du phénomène par lequel un électron est excité d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie

⁶⁰⁰ J. McEwen, « Jablonski diagram », LibreTexts Chemistry, Introduction, §2. Nous traduisons les passages cités.

supérieur. L'énergie du photon est transférée à cet électron particulier et a pour conséquence de lui faire prendre un nouvel état propre si l'énergie de la longueur d'onde absorbée est égale à la différence des deux niveaux. Une fois qu'un électron est excité, il peut dissiper cette énergie de plusieurs manières. La première forme de dissipation est nommée *relaxation vibratoire*. Il s'agit d'un processus qui est indiqué par la flèche bleue ondulée située entre les niveaux vibratoires (voir Figure 196). C'est le processus par lequel « l'énergie apportée par le photon à l'électron est cédée à d'autres modes vibratoires sous forme d'énergie cinétique⁶⁰¹ ». Cette énergie cinétique peut rester dans la molécule excitée ou être transférée à d'autres molécules voisines. Une seconde forme de dissipation est l'émission d'un photon par la molécule elle-même, nommée *fluorescence*. Elle est indiquée sur la Figure 195 par la flèche rectiligne de couleur rouge pointant vers le bas :

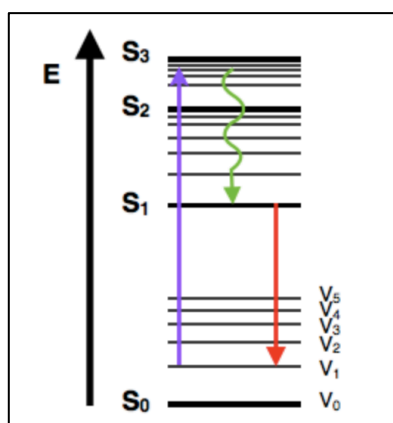


Figure 195 : Diagramme de Jablonski représentant les phénomènes d'absorption, de relaxation vibratoire et de fluorescence dans une molécule⁶⁰²

Une troisième forme de dissipation énergétique est la *conversion intersystème* (voir Figure 196), où « l'électron change de multiplicité de spin, en passant d'un état singulet

⁶⁰¹ J. McEwen, art. cit., Vibrational Relaxation and Internal Conversion, §1.

⁶⁰² Source de la Figure 195 : « Jablonski diagram », art. cit.

excité à un état triplet excité⁶⁰³ ». Elle est indiquée par une flèche horizontale ondulée de couleur marron entre les deux colonnes de la Figure 196 :

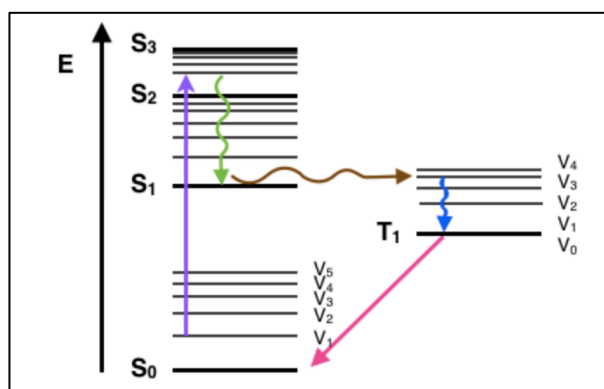


Figure 196 : Diagramme de Jablonski représentant le phénomène de conversion intersystème⁶⁰⁴

De cette façon, les diagrammes de Jablonski facilitent la visualisation et la communication du fonctionnement interne de phénomènes quantiques complexes.

Représentations graphiques connexes : diagramme de Feynman, diagramme de Grotrian, diagramme d'orbitales moléculaires.

7.13 Diagramme de Minkowski : voir chapitre 5, 3.1

Représentations graphiques connexes : diagramme de Brehme, diagramme de Loedel, diagramme de Penrose-Carter.

7.14 Diagramme de Penrose-Carter : chapitre 5, 3.2

Représentation graphique connexe : diagramme de Minkowski.

7.15 Diagramme de phases : voir chapitre 5, 2.1

Représentations graphiques connexes : diagramme QFL, diagramme ternaire.

⁶⁰³ J. McEwen, « Jablonski diagram », Intersystem Crossing, §1.

⁶⁰⁴ Source de la Figure 196 : « Jablonski diagram », art. cit.

7.16 Diagramme de Randolph : voir chapitre 6, 2.2

7.17 Diagramme ternaire : voir chapitre 5, 1.1

7.18 Diagramme de Venn ; voir chapitre 1, 4.2

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES ET SITOGRAPHIQUES DES NOTICES DU CORPUS

Sources bibliographiques

- Airey John et Urban Eriksson, « Unpacking the Hertzsprung-Russell Diagram : A Social Semiotic Analysis of the Disciplinary and Pedagogical Affordances of a Central Resource in Astronomy », *Designs for Learning*, vol. 11, n° 1, Stockholm University Press, 2019, p. 99-107.
- Alexander J. W. et G. B. Briggs, « On Types of Knotted Curves », *Annals of Mathematics*, vol. 28, n° 1/4, 1926, p. 562-586.
- Bachman Charles W., « Data structure diagrams », *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, vol. 1, n° 2, 1969, p. 4-10.
- Barksdale James B., « Sets and Randolph Diagrams », *Western Kentucky University*, Bowling Green, 1970. 19 p.
- Beniger James R. et Dorothy L. Robyn, « Quantitative Graphics in Statistics : A Brief History », *The American Statistician*, vol. 32, n° 1, 1978, p. 1-11.
- Bergman Bo et Bengt Klefsjö, *Quality : from customer needs to customer satisfaction*, Lund, Studentlitteratur, 2007.
- Best M. et D. Neuhauser, « Kaoru Ishikawa : from fishbones to world peace », *Quality & Safety in Health Care*, vol. 17, n° 2, 2008, p. 150-152.
- Boulanger Jean-Louis, *Applications logicielles certifiables 3 : cycle descendant*, Paris, ISTE, 2018.
- Coumet Ernest, « Les diagrammes de Venn », *Mathématiques et Sciences humaines*, vol. 10, 1965, p. 31-46.
- Coxeter H. S. M., « The Evolution of Coxeter-Dynkin Diagrams », in T. Bisztriczky, P. McMullen, R. Schneider et A. Ivić Weiss (dir.), *Polytopes: Abstract, Convex and Computational*, Dordrecht, Springer Netherlands, coll. « NATO ASI Series », 1994, p. 21-42.
- Coxeter H. S. M., « Regular and semi-regular polytopes. I », *Mathematische Zeitschrift*, vol. 46, n° 1, 1940, p. 380-407.

- Davenport Horace W., *The ABC of Acid-Base Chemistry : the Elements of Physiological Blood-Gas Chemistry for Medical Students and Physicians*, Chicago, University of Chicago Press, 1947.
- David Albert et Sébastien Damart, « Bernard Roy et l'aide multicritère à la décision », *Revue française de gestion*, vol. 214, n° 5, 2011, p. 15-28.
- Day Charles, *Industrial Plants : Their Arrangement and Construction*, New York, Engineering Magazine Co., 1911.
- Day Charles, « The Routing Diagram as a Basis for Laying Out Industrial Plants », *The Engineering Magazine*, 1910, p. 809-821.
- De Finetti Bruno, « Considerazioni matematiche sull'ereditarietà mendeliana », *METRON*, n° 1, 1926, p. 3-41.
- De Toffoli Silvia et Valeria Giardino, « Forms and Roles of Diagrams in Knot Theory », *Erkenntnis*, vol. 79, n° 4, 2014, p. 829-842.
- Desachy Bruno, « Formaliser le raisonnement chronologique et son incertitude en archéologie de terrain », *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2012 (DOI : 10.4000/cybergeo.25233).
- Djindjian François et Bruno Desachy, « Sur l'aide au traitement des données stratigraphiques des sites archéologiques », *Histoire & Mesure*, vol. 5, n° 1, 1990, p. 51-88.
- Durand-Gasselin Maxime, *Mise au point d'un dispositif de mesure d'impédance complexe, micro-onde et cryogénique*, mémoire présenté au département de physique en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences, Sherbrooke, Québec, Canada, 2 novembre 2018 (en ligne : <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/14186>).
- Dynkin Evgenii, « Classification of the simple Lie groups », *Matematicheskii Sbornik*, vol. 18, n° 2, 1946, p. 347-353.
- Ellingham Harold Johann Thomas, « Transactions and Communications », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 63, n° 5, 1944, p. 125-160.
- Eschenbrenner Vincent, « Principes généraux d'interprétation des diagrammes triangulaires : application à la comparaison de matériaux pédologiques », *Cahiers ORSTOM*, vol. XXVI, n° 1, 1991, p. 63-86.

- Feynman R. P., « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics », *Physical Review*, vol. 76, n° 6, American Physical Society, 1949, p. 769-789.
- Grothendieck Alexandre, « Sur quelques points d'algèbre homologique, I », *Tohoku Mathematical Journal*, vol. 9, n° 2, Tohoku University, Mathematical Institute, 1957, p. 119-221.
- Jedrzejewski Franck, *Diagrammes et Catégories*, Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot - Paris VII, 2007.
- Kimberling Clark, « The origin of Ferrers graphs », *The Mathematical Gazette*, vol. 83, n° 497, Cambridge University Press, 1999, p. 194-198.
- Lefebvre Muriel, « Construction et déconstruction des diagrammes de Dynkin », *Actes de la recherche en sciences sociales*, vol. 141-142, n° 1-2, 2002, p. 121-126.
- Lelong Bernard, « Exposé du 11 octobre 2001 : utilisation des diagrammes en Géologie (résumé) », *Publications de la Société Linnéenne de Lyon*, vol. 71, n° 6, 2002, p. 240-241.
- Maruyama Magoroh, « THE SECOND CYBERNETICS : Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes », *American Scientist*, vol. 51, n° 2, The Scientific Research Society, 1963, p. 164-179.
- McEwen Jordan, « Jablonski diagram », LibreTexts Chemistry. URL : [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Jablonski_diagram](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Jablonski_diagram)
- Moktefi Amirouche, « La théorie syllogistique de Lewis Carroll », *Les Cahiers philosophiques de Strasbourg*, n° 28, Presses universitaires de Strasbourg, 2010, p. 207-224. <https://doi.org/10.4000/cps.2798>
- Nicolas Jean-Philippe, « The Conformal Approach to Asymptotic Analysis », in Lizhen Ji, Athanase Papadopoulos et Sumio Yamada (dir.), *From Riemann to Differential Geometry and Relativity*, Cham, Springer International Publishing, 2017, p. 571-609.
- Pavel Ilarion, « La prédiction de l'antimatière par Dirac », *Bibnum. Textes fondateurs de la science*, FMSH - Fondation Maison des sciences de l'homme, 2011 (en ligne : <http://journals.openedition.org.scd1.univ-fcomte.fr/bibnum/809>).

- Pellerin Jeanne, *Prise en compte de la complexité géométrique des modèles structuraux dans des méthodes de maillage fondées sur le diagramme de Voronoï*, Thèse de doctorat en géosciences, Université de Lorraine, 2014.
- Randolph John F., « Cross-Examining Propositional Calculus and Set Operations », *The American Mathematical Monthly*, vol. 72, n° 2, Taylor & Francis, 1965, p. 117-127.
- Reidemeister Kurt, « Elementare Begründung der Knotentheorie », *Abhandlungen aus dem Mathematischen Seminar der Universität Hamburg*, vol. 5, n° 1, 1927, p. 24-32.
- Roditi Éric, « L'histogramme : à la recherche du savoir à enseigner », *Spirale - Revue de recherches en éducation*, vol. 43, n° 1, 2009, p. 129-138.
- Schaffner John H., « A General System of Floral Diagrams », *The Ohio Journal of Science*, vol. 16, n° 8, 1916, p. 360-366.
En ligne : <https://kb.osu.edu/handle/1811/1914>.
- Singh Shree Prakash, Sujata Sengar, Rochak Bajpai et Sridhar Iyer, « Next-Generation Variable-Line-Rate Optical WDM Networks : Issues and Challenges », *J. Opt. Commun.*, vol. 34, n° 4, 2013, p. 331-350.
- Straw R. D. et al. (eds.), *The ARRL Antenna Book*, 20th ed., Newington, ARRL, 2005.
- Streckeisen A., « Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of Igneous Rocks », *Geologische Rundschau*, vol. 63, n° 2, 1974, p. 773-786.
- Sylvester J. J. et F. Franklin, « A Constructive Theory of Partitions, Arranged in Three Acts, an Interact and an Exodion », *American Journal of Mathematics*, vol. 5, n° 1, Johns Hopkins University Press, 1882, p. 251-330.
- Tajini Reda et Saâd Lissane Elhaq, « Méthodologie de mesure du travail dans l'industrie du câblage : étude de cas industriel », *Conférence Internationale Conception et Production Intégrées*, vol. 7, n° 1, p. 79-80.
https://www.researchgate.net/publication/278032038_Methodologie_de_mesure_du_travail_dans_l%27industrie_du_cablage_Etude_de_cas_industriel
- Treméau Alain, « Éléments de base de la colorimétrie », 2014.
https://www.researchgate.net/publication/228865474_Elements_de_base_de_la_colorimetrie

Venn John, « I. On the diagrammatic and mechanical representation of propositions and reasonings », *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 10, n° 59, Taylor & Francis, 1880, p. 1-18.

Vicaut Éric et A. Bertrand, *Physico-chimie, électrophysiologie : cours exercices et tests*, Paris, Masson, 1996.

Voronoi Georges, « Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs. », *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 134, p. 198-287.

Zemirli Nesrine, *Modèle d'accès personnalisé à l'information basé sur les diagrammes d'influence intégrant un profil utilisateur évolutif*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.

Sources sitographiques

« Abaque de Smith », in *Wikipédia*.

https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Abaque_de_Smith&oldid=170178980

« Adaptation d'impédances », in *Wikipédia*.

https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Adaptation_d%27imp%C3%A9dances&oldid=177172792

« Analyse fonctionnelle (conception) », in *Wikipédia*.

[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyse_fonctionnelle_\(conception\)&oldid=183507902](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyse_fonctionnelle_(conception)&oldid=183507902)

« Analyse fonctionnelle descendante », in *Wikipédia*.

https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Analyse_fonctionnelle_descendante&oldid=182121866

« Bifurcation theory », in *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Bifurcation_theory&oldid=1006582564

« Causal loop diagram », in *Wikipedia*.

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Causal_loop_diagram&oldid=988189824

- « Charles Day (1879-1931) », in *Wikipedia*.
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_Day_\(1879-1931\)&oldid=1003620205](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_Day_(1879-1931)&oldid=1003620205)
- « CIE xy », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=CIE_xy&oldid=174367231
- « Cinétopographie Laban », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Cin%C3%A9tographie_Laban&oldid=182896039
- « Constellation diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Constellation_diagram&oldid=1016510377
- « Coxeter–Dynkin diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Coxeter%E2%80%93Dynkin_diagram&oldid=1022490409
- « Data structure diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Data_structure_diagram&oldid=933447846
- « Diagram », in *Wikipedia*.
<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagram&oldid=1027117857>
- « Diagrama », in *Wikipedia, la enciclopedia libre*.
<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagrama&oldid=133288425>
- « Diagramma », in *Wikipedia*.
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramma&oldid=111736680>
- « Diagramme », in *Wikipédia*.
<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme&oldid=178828595>
- « Diagramme de Bode », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Bode&oldid=176691949
- « Diagramme de Carroll », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Carroll&oldid=172628746

- « Diagramme de causes et effets », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_causes_et_effets&oldid=181366174
- « Diagramme de chromaticité », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_chromaticit%C3%A9&oldid=182987829
- « Diagramme de Clapeyron », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Clapeyron&oldid=163273745
- « Diagramme commutatif », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_commutatif&oldid=179891208
- « Diagramme de constellation », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_constellation&oldid=122490187
- « Diagramme de cycle », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_cycle&oldid=181366390
- « Diagramme de Davenport », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Davenport&oldid=172616476
- « Diagramme d'Ellingham », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_d%27Ellingham&oldid=182534903
- « Diagramme d'Euler », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_d%27Euler&oldid=173833733
- « Diagramme de Feynman », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Feynman&oldid=182131949
- « Diagramme de flux », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_flux&oldid=165359292

- « Diagramme de Frost », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Frost&oldid=178767594
- « Diagrammes de Haigh et de Goodman », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagrammes_de_Haigh_et_de_Goodman&oldid=157385380
- « Diagramme de Hasse », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Hasse&oldid=155151389
- « Diagramme de Hertzsprung-Russell », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Hertzsprung-Russell&oldid=180508593
- « Diagramme de Jablonski », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Jablonski&oldid=161200829
- « Diagramme de l'œil », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_l%27%C5%93il&oldid=179717775
- « Diagramme de Lexis », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Lexis&oldid=146304607
- « Diagramme de Minkowski », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Minkowski&oldid=180157994
- « Diagramme de Moody », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Moody&oldid=162175285
- « Diagramme de Pareto », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Pareto&oldid=181119354
- « Diagramme de Penrose-Carter », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Penrose-Carter&oldid=181626335

- « Diagramme de phase », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_phase&oldid=183255236
- « Diagramme de Pourbaix », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Pourbaix&oldid=183500607
- « Diagramme de Ramachandran », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Ramachandran&oldid=161054133
- « Diagramme de Sankey », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Sankey&oldid=179360327
- « Diagramme de Schlegel », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Schlegel&oldid=174943239
- « Diagramme de temps », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_temps&oldid=177893708
- « Diagramme de Venn », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Venn&oldid=178799647
- « Diagramme de Voronoï », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_de_Vorono%C3%AF&oldid=181919497
- « Diagramme enthalpique », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_enthalpique&oldid=162000288
- « Diagramme floral », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_floral&oldid=16810388
- « Diagramme horaire », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_horaire&oldid=168945177

- « Diagramme sagittal », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_sagittal&oldid=167112352
- « Diagramme spaghetti », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_spaghetti&oldid=183095385
- « Diagramme ternaire », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Diagramme_ternaire&oldid=181647499
- « DRAKON », in *Wikipédia*.
<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=DRAKON&oldid=183115132>
- « Dynkin diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dynkin_diagram&oldid=1027322949
- « Floral diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Floral_diagram&oldid=1018454225
- « Function analysis system technique », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Function_analysis_system_technique&oldid=183439912
- « Génie logiciel », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=G%C3%A9nie_logiciel&oldid=182781420
- « Harris matrix », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Harris_matrix&oldid=1016533422
- « Isotype (pictogramme) », in *Wikipédia*.
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Isotype_\(pictogramme\)&oldid=131464645](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Isotype_(pictogramme)&oldid=131464645)
- « Jones diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Jones_diagram&oldid=1025007081
- « Mouvements de Reidemeister », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mouvements_de_Reidemeister&oldid=177585705

- « Partition d'un entier », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Partition_d%27un_entier&oldid=175780917
- « Planning chemin de fer », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Planning_chemin_de_fer&oldid=163737502
- « QAPF diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=QAPF_diagram&oldid=1019826361
- « Randolph diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Randolph_diagram&oldid=894525737
- « Réactance (électricité) », in *Wikipédia*.
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9actance_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)&oldid=163724006](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9actance_(%C3%A9lectricit%C3%A9)&oldid=163724006)
- « Représentation de Fresnel », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Repr%C3%A9sentation_de_Fresnel&oldid=165980716
- « Roche magmatique », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Roche_magmatique&oldid=183287684
- « Routing diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Routing_diagram&oldid=1026919548
- « Serial Peripheral Interface », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Serial_Peripheral_Interface&oldid=177415282
- « Software engineering », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Software_engineering&oldid=1026604845
- « Structured analysis and design technique », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Structured_analysis_and_design_technique&oldid=1015248146

- « Structure des protéines », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Structure_des_prot%C3%A9ines&oldid=179905079
- « Tableau de Young », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tableau_de_Young&oldid=181297330
- « Texture du sol », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Texture_du_sol&oldid=180799278
- « Time–distance diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Time%E2%80%93distance_diagram&oldid=968819147
- « Treillis de Young », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Treillis_de_Young&oldid=1792851
- « Type spectral », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Type_spectral&oldid=181342708
- « UML (informatique) », in *Wikipédia*.
[https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=UML_\(informatique\)&oldid=179459791](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=UML_(informatique)&oldid=179459791)
- « Unified Modeling Language », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Unified_Modeling_Language&oldid=1020625438
- « Visualisation de données », in *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Visualisation_de_donn%C3%A9es&oldid=183358872
- « Voronoi diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Voronoi_diagram&oldid=1024368032
- « Wiggers diagram », in *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wiggers_diagram&oldid=1013082727

ANNEXE 2. GLOSSAIRE

Abaque	521
Affordance	521
Affordance représentationnelle.....	521
Algèbre.....	521
Algorithme.....	522
Algorithmique.....	522
Amplification.....	522
Amplification transductive.....	522
Amplification modulatrice	523
Amplification organisante	523
Analogie	523
Analogie de proportion.....	523
Analogie de proportionnalité	524
Analogie structurale.....	524
Analogie opératoire.....	524
Ancrage matériel.....	524
Atome analogique.....	525
Autothéticité	526
Axiomatique.....	526
Calcul.....	526
Carte.....	527
Cartogramme	527
Cartographie	527
Catégorie	527
Chaîne opératoire	528
Connaissance	528
Conscience	528
Cybernétique	529
Cycle opératoire	529

Démonstration	529
Diagrammatique	529
Diagrammatisation	529
Diagrammatologie	530
Diagramme	531
Différence phénoménologique	534
Dispositif	534
Dispositif concret	534
Dispositif abstrait.....	534
Dispositif discret	534
Encyclopédie	535
Figure (graphique)	535
Format	535
Forme	535
Forme discursive	535
Forme esthétique.....	535
Forme opératoire.....	535
Forme organique	536
Forme symbolique	536
Formel.....	536
Formule/diagramme	536
Geste.....	536
Graphe	536
Graphique.....	537
Informatique.....	537
Intelligence.....	537
Intelligence artificielle	537
Lexicogramme	537
Lisibilité.....	538
Logigramme	538
Méthode	538

Méthode graphique.....	538
Méthode de calcul	538
Modalité diagrammatique (virtuel, potentiel, actuel).....	538
Modèle	541
Modulateur	541
Morphisme	541
Morphogenèse.....	541
Notation	542
Opération.....	542
Ortho-praticité.....	542
Outil	543
Phénoménographie	543
Phénoménologie	543
Physique.....	543
Pictogramme	543
Postulat.....	544
Postulat de relationnalité	544
Preuve.....	547
Preuve informatique	547
Preuve mathématique	547
Preuve rhétorique.....	547
Principe d'équivalence fonctionnelle	547
Programme/diagramme.....	547
Recette/diagramme	548
Représentation.....	549
Représentation d'une opération	549
Représentation opératoire.....	549
Réseau/diagramme	550
Schéma/schématisation	550
Tableau	551
Technique	552

Théorie des catégories	552
Transduction	552
Vie pratique	552

ABAQUE : dispositif matériel physique ou graphique dont la manipulation permet la réalisation de calculs. Comprendre un abaque, c'est faire des calculs avec lui en l'utilisant.

AFFORDANCE : saillance qui facilite l'exécution d'une opération pratique.

AFFORDANCE REPRESENTATIONNELLE : saillance graphique qui facilite l'exécution d'une opération cognitive (Giardino, 2018).

ALGÈBRE : désigne la technique des manipulations symboliques et des opérations graphiques ordonnées à une axiomatique finitaire, implicite ou explicite, c'est-à-dire à un système de propositions supposées vraies, mais non démontrées, qui jouent le rôle de règles dans un jeu calculatoire. Une algèbre est donc un dispositif ou système formel de calcul, c'est-à-dire une machine sémiotique sans signification, puisqu'elle n'est pas nécessairement munie d'une sémantique référentielle comme une diagrammatique. C'est une machine graphique de calcul. Elle devient un modèle physico-mathématique lorsqu'on réussit à lui associer un ensemble de mesures expérimentales. Par exemple l'algèbre matricielle d'Heisenberg est un modèle mathématique d'évolution de quantités physiques, car grâce à elle, les sauts quantiques peuvent être interprétés comme des matrices qui évoluent dans le temps. Pour devenir une *algorithmique*, une algèbre doit être implémentable et exécutable par un programme. Pour devenir une *diagrammatique*, elle doit être munie d'une sémantique référentielle et d'une sémantique opérationnelle afin d'être capable d'ordonner les bonnes opérations pratiques à opérer dans un domaine défini du monde.

ALGORITHME : méthode de calcul composée d'une liste finie d'instructions qui peut être exécutée par un programme informatique pour résoudre automatiquement un problème. Un algorithme est une suite d'opérations ordonnées, qu'on peut confier à un ordinateur, de sorte qu'il donne la solution du problème dont l'algorithme est la méthode de résolution calculatoire, en un temps relativement raisonnable. L'algorithme, pilotant l'exécution d'un programme sur un support dynamique – la machine de Turing – est donc une méthode de résolution qui s'exécute dans un intervalle temporel raisonnable à travers une physique des signes qui est une mécanique sans substrat, parce qu'elle fait abstraction de la dynamique de la matière.

ALGORITHMIQUE : géométrie du temps (Bachimont, 1996) et physique des signes (Bachimont, 1994) qui est une mécanique abstraite dans la mesure où elle fait abstraction de l'infini non dénombrable au cœur de tout intervalle temporel réalisé et donc aussi de la dynamique de la matière qui opère à l'intérieur de cet intervalle.

AMPLIFICATION : émergence d'une forme stable.

AMPLIFICATION TRANSDUCTIVE : émergence d'une forme qui procède de la rencontre d'un germe et d'un milieu pourvu d'une énergie potentielle en raison d'une identité de structure de leurs composants. Cette identité de structure est ce qui rend possible l'émergence de la forme à partir du moment où le germe est introduit dans le milieu pourvu de potentiels (Simondon, 1962). Il en résulte l'actualisation des potentiels, qui produisent la cristallisation progressive du milieu par transfert d'information. La structure de la forme achevée donnée au terme du processus d'actualisation qui s'opère par amplification transductive est analogue, dans ses parties comme dans sa totalité, à la structure des éléments mis en rapport.

L'isomorphie finale procède du transfert multiplicatif de la structure lors de l'actualisation. L'amplification transductive désigne ce transfère multiplicatif dans son effectivité tel qu'il conduit à la génération d'un objet de dimension trois, par exemple un cristal, dont la structure est isomorphe à celle de ses composants. C'est un modèle de société analogique.

AMPLIFICATION MODULATRICE : amplification dont l'actualisation est contrôlée à chaque instant du temps. Elle résulte du contrôle de l'énergie d'un système fermé. L'exemple paradigmatique de ce type d'amplification est donné par le dispositif triode au principe du fonctionnement d'une lampe (Simondon, 1962).

AMPLIFICATION ORGANISANTE : amplification qui procède de l'agencement de processus transductifs et modulateurs pour donner une forme organisée à l'issue d'une action coordonnée ou d'un processus d'invention (Simondon, 1962). C'est ce type d'amplification qui est au principe de l'émergence d'une nouvelle fonction chez une espèce vivante (la perception en trois dimensions par exemple) ou d'un perfectionnement majeur dans le cas de l'évolution d'un objet technique inventé (le passage de la diode à la triode par exemple).

ANALOGIE

ANALOGIE DE PROPORTION : analogie qui établit des ressemblances graduées entre des termes. C'est une ressemblance perceptive opérée par association d'idées. *A* ressemble à *B*, *B* ressemble à *C*, etc.

ANALOGIE DE PROPORTIONNALITE : analogie qui établit des identités de rapports. A est à B , ce que C est à D . C'est une analogie opératoire qui ne thématise pas l'idée de transformation.

ANALOGIE STRUCTURALE : identité de rapports structuraux saisie entre les parties d'objets, de systèmes ou d'ensembles différents. C'est un approfondissement de l'analogie de proportion puisqu'elle vise à analyser et à caractériser la complexité des relations entre les éléments de différents ensembles pour en identifier l'isomorphie partielle ou totale.

ANALOGIE OPERATOIRE : identité de rapports opératoires entre des situations d'interaction. Exemple : le pêcheur à la ligne est aux poissons ce que le sophiste est aux jeunes gens riches (cf. Platon, *Sophiste*). Elle permet de mettre au jour l'idée qu'une même transformation peut modifier de la même façon des objets de nature différente. À la différence de l'analogie de proportionnalité, l'analogie opératoire thématise l'idée de transformation. L'analogie opératoire est le fondement de la technologie comme science des transformations opérables et répétables dans des systèmes qui fonctionnent. L'analogie opératoire est l'approfondissement de l'analogie de proportionnalité.

ANCRAGE MATERIEL : fondement de la théorie du support (Bachimont, 2004). Pas d'inscription sans ancrage matériel dans un support : ce support peut être physique, technique ou organique. Par exemple l'air est l'ancrage matériel physique d'un signal vocal qui en rend possible la propagation. Le papier est l'ancrage matériel technique d'une forme typographique qui en rend possible l'inscription durable. Le corps est l'ancrage matériel organique d'une expérience

vécue qui en rend possible la remémoration. La notion d'« ancre matérielle » (*material anchor*) a été introduite par E. Hutchins dans un article de 2005. Elle désigne une structure matérielle prêtant sa forme à une structure conceptuelle : ainsi la queue chez le boulanger est le support matériel d'une intégration conceptuelle entre une ligne et une flèche, qui permet de savoir qui fait partie de la queue et qui est le prédécesseur et le successeur de chaque participant. Ce qui est sous-jacent à cette notion d'ancrage matériel, c'est l'idée d'incarnation symbolique de concepts abstraits qui acquièrent un caractère dynamique dès lors qu'ils sont situés dans un contexte particulier d'interaction. L'intérêt des ancres matériels est qu'ils sont au principe de l'identification d'invariants opératoires : ils permettent de faire des allers-retours entre des situations concrètes et des modélisations abstraites, et d'opérer une schématisation de l'expérience qui permet de retenir l'essentiel d'une situation d'interaction en terme de compréhension, et de fournir à l'issue d'une modélisation diagrammatique des outils cognitifs qui nous donnent une prise sur le réel tout en nous débarrassant des scories de l'expérience, c'est-à-dire de tout un ensemble de détails inessentiels.

ATOME ANALOGIQUE : c'est l'unité opératoire minimale captée par un système de signes finis qui pose une équivalence de rapports saisis entre au moins quatre termes, abstraction faite de la complexité réelle des objets, ensembles ou systèmes auxquels ces termes se rapportent. L'atome analogique permet de mettre au jour l'idée de noyau opératoire, qui peut tout autant être capté par un symbole graphique qui le schématise que signifié par un verbe qui l'exprime. En effet si on prend comme situation paradigmatique d'atomicité analogique l'identité de rapports opératoires entre 1° un pêcheur à la ligne et des poissons et 2° un sophiste et des jeunes gens riches, le symbole graphique le plus simple pour capturer une telle opération est la flèche. Car la flèche étant orientée, elle matérialise et symbolise de façon commode une intention opératoire qu'elle schématise. Or si on

double la flèche d'un ensemble de verbes qu'on lui associe (dans ce cas hameçonner et séduire) on peut alors opérer la déclinaison paradigmatique d'une opération de capture. Dans cet exemple, on transforme la flèche en symbole signifiant : le symbole graphique qu'est la flèche devient par pure convention l'aide-mémoire d'un rapport opératoire. Car elle aurait tout aussi bien pu schématiser la flèche d'un arc et alors signifier une opération de décochement entre un chasseur et du gibier. Maintenant, si on opère la sériation de symboles d'opérations autres que la flèche, on accède à l'axe syntagmatique de la diagrammatologie, où se matérialise un enchaînement d'opérations symbolisées graphiquement dont la finalité est de schématiser un processus de résolution de problème pratique qui n'est pas soluble dans un codage algorithmique. L'ordre des opérations définira un ordre des transformations à suivre et la chaîne opératoire comme représentation de l'ensemble fini des opérations symbolisées graphiquement représentera le diagramme des transformations à opérer.

AUTOTHECITE : autoposition de l'effectivité calculatoire (Bachimont, 2000).

AXIOMATIQUE : forme achevée que prend une théorie déductive (Blanché, 1955).

C'est un dispositif technographique formel qui permet d'opérer une classe définie de calculs papier-crayon.

CALCUL : processus effectif de manipulation d'entités dans un espace de déplacement.

C'est pourquoi tout processus physique qui manipule peut être décrit comme opérant un calcul.

CARTE : outil de représentation graphique originellement destiné à représenter un territoire, dont la fonction est de permettre à son utilisateur de se déplacer dans un espace géographique.

CARTOGRAMME : outil graphique combinant cartographie et représentation graphique de données.

CARTOGRAPHIE : art de construire des cartes.

CATEGORIE : d'origine juridique, le mot provient du verbe grec *kata-agorein* qui signifie « parler sur ou contre quelque chose ou quelqu'un publiquement ». Aristote en détournera l'usage juridique (au sens d'accusation publique) dans le tome 1 de son traité de logique, l'*Organon* (mot qui en grec veut dire « outil » ou « instrument ») pour lui faire désigner les différents sens du mot être, c'est-à-dire les différentes manières dont une chose peut être prédiquée dans une proposition. Il en dénombre dix : substance (un homme), quantité (deux coudées), qualité (le blanc), relation (la moitié), lieu (au Lycée), temps (hier), position (il est assis), possession (il est armé), action (il coupe) et passion (il est coupé). Kant reprendra cette grande question des catégories dans la *Critique de la raison pure*, dans le cadre de l'élaboration d'une logique transcendantale. Avec Kant, la définition stricte de ce qu'on doit appeler catégorie devient la suivante : on appelle catégorie les concepts qui se disent de tout objet de l'expérience possible. Par exemple « Lion » n'est pas une catégorie parce qu'on ne peut pas dire « Lion » de tout objet de l'expérience possible. En revanche, tout objet de l'expérience possible a une cause et est lui-même cause d'autres choses. Donc la causalité sera définie comme une catégorie de l'entendement (il s'agit de la seconde catégorie de la relation). Enfin en théorie mathématique des catégories, une catégorie désigne une

opération étudiée indépendamment de l'objet sur lequel elle opère. La théorie des catégories est l'étude des propriétés des opérations formelles faisant abstraction des objets sur lesquels elles opèrent.

CHAINE OPERATOIRE : représentation d'une séquence d'opérations pratiques.

CONNAISSANCE : capacité à effectuer une opération pour atteindre un but fixé.

CONSCIENCE : le problème de la rationalité est de savoir comment une pensée, qui est toujours « auto-justificative » dans sa spontanéité (Simondon, 2013, p. 84), doit se justifier, c'est-à-dire être reliée à un principe de structuration qui la justifie comme pensée structurée. Si la conscience peut simultanément être définie comme manifestation d'un contenu de pensée pour un sujet (une conscience phénoménologique pour laquelle toute conscience est conscience de quelque chose) et comme expression du fonctionnement d'un système complexe (phénomène scientifique), donc d'un système déjà structuré, alors le principe de structuration de la conscience phénoménologique peut être trouvé grâce au principe d'équivalence fonctionnelle : une opération réfléchie (celle d'un sujet qui réagit à un donné avec un temps de latence nommé temps de réflexion), comme structure consciente qui se réalise en réaction positive ou négative, peut équivaloir à une opération spontanée, qui se réalise comme réaction d'une structure au sein d'un système non pourvu de conscience (Simondon, 2016 [1953], p. 60). La conscience peut alors se mesurer en termes de structures équivalentes entre des opérations spontanées et des opérations réfléchies, et les degrés de la conscience, en degrés structuraux. Suivant cette hypothèse, la continuité des états de conscience pourrait alors être ordonnée de façon quantique depuis une quantité inférieure

absolue qu'il faudrait déterminer ; les niveaux de structuration de ces états seraient alors relatifs à la quantité d'information qu'ils intègrent.

CYBERNETIQUE : technologie unificatrice des sciences objectives empiriques séparées, qui rend possible un encyclopédisme de la connaissance technologique.

CYCLE OPERATOIRE : outil + geste qui le rend techniquement efficace dans une opération particulière.

DEMONSTRATION : dans la pratique mathématique un diagramme est une méthode d'accès à un théorème par la production d'une preuve. Il y a donc autant de diagrammes qu'il y a de manières de prouver un théorème. L'élégance d'une démonstration renvoie à l'économie de moyens grâce auxquels on parvient à produire une preuve qui autorise l'universalisation d'un énoncé portant sur la propriété d'une classe d'objets bien définis.

DIAGRAMMATIQUE : géométrie de la pensée conceptuelle significative incarnée dans des représentations symboliques de type diagrammatique. C'est aussi une dynamique de la matière sémiotique physiquement informée, techniquement formatée et organiquement ancrée.

DIAGRAMMATISATION : la fonction d'un diagramme est de produire un résultat à travers sa manipulation ou de guider une action pour atteindre un objectif donné. À la différence du schéma, le diagramme n'est pas un véhicule d'information ou de connaissance, mais une machine graphique à donner des réponses à des questions ou résoudre des problèmes (dès lors qu'on sait comment le diagramme fonctionne, c'est-à-dire quelles sont les conventions interprétatives qui permettent

de le lire pour le manipuler ou faire ce qu'il prescrit). Un diagramme peut donc être une machine sémiotique ou un outil cognitif. C'est donc un assistant graphique de résolution de problèmes qui produit des connaissances théoriques lorsqu'il est utilisé *pour lui-même* ; ou qui produit des connaissances pratiques lorsqu'il est utilisé comme modèle d'interactions concrètes avec des objets ou des situations du monde réel qu'il permet de simuler pour mieux les réaliser. On peut ainsi déjà distinguer deux grandes classes de diagrammes : les diagrammes théoriques et les diagrammes pratiques. Les premiers sont des machines sémiotiques à produire des connaissances ou des solutions théoriques et abstraites, tandis que les seconds sont des machines sémiotiques à faire produire des opérations concrètes qu'elles guident. Les diagrammes utilisés en science sont théoriques : ils permettent de déduire des conséquences dès lors qu'ils sont manipulés (diagrammes utilisés en mathématiques, en physique, en biologie), d'exhiber un mécanisme de fonctionnement (dogme de la biologie moléculaire) ou de pratiquer plus aisément des calculs (diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs, algèbre de Racah sur les moments angulaires en mécanique quantique, etc.). Les diagrammes utilisés dans la vie courante sont pratiques : ils permettent de construire des objets (mode d'emploi), d'organiser des tâches et de les planifier (diagrammes de gestion de projet, diagramme d'Ishikawa), de répondre à des situations de risques (mode opératoire) ou encore de programmer des actions complexes (Concept d'opérations ou CONOPS).

DIAGRAMMATOLOGIE : phénoménologie de la connaissance pratique. La diagrammatologie désigne selon nous une phénoménologie de la connaissance opératoire qui vise à dépasser l'opposition de la « différence phénoménologique » (Bachimont, 1992) en ayant recours à une écriture diagrammatique dont la fonction est d'articuler sur un même plan sémiotique le catégoriel et le calculatoire

avec comme critère de convergence le caractère iconique des langages formels et des langues naturelles, c'est-à-dire leur caractère analogique. Une première écriture diagrammatique nous a été donnée avec les graphes existentiels de Peirce et plus récemment avec les graphes conceptuels de Sowa.

DIAGRAMME : machine sémiotique qui donne accès à de la finitude matérielle non calculable. C'est à la fois une technique de modélisation graphique des connaissances pratiques et un outil cognitif qui permet à la conscience théorique de devenir une conscience pratique, c'est-à-dire une « intentionnalité opérative » (Husserl). Un diagramme produit l'augmentation de la conscience qui s'en saisit et la transforme en conscience pratique techniquement informée. Exemple de diagrammes : diagramme logique, diagramme de phase.

Pourquoi peut-on dire d'un diagramme que c'est une machine ? Parce qu'il est doté d'un fonctionnement et que ce fonctionnement, lorsqu'il est mis en marche, produit un résultat recherché qui donne un sens temporel et pratique à sa fonction de diagramme. Par exemple : produire une inférence valide dans le cadre d'un diagramme de Venn. Le sens du diagramme est sa finalité pratique dans le cadre d'un processus de résolution de problème qu'on ne peut pas coder algorithmiquement. Comme un algorithme, un bon diagramme est un diagramme qui conduit à la production d'un processus qui termine, c'est-à-dire que c'est une représentation qui conduit au déroulement d'un processus temporellement fini qui produit une résolution. Un diagramme a donc deux modalités d'être au monde : une modalité *virtuelle* en tant que représentation ; une modalité *actuelle* en tant que processus temporellement fini qui met en œuvre cette virtualité dans un processus d'actualisation produit par un acte de lecture qui s'exprime à travers une écriture « transcursive » (Deleuze et Guattari, 1972) à même le réel se déroulant sur un théâtre des opérations effectives.

Le schéma est l'élément constitutif du diagramme : c'est la représentation d'une de ses parties fonctionnelles. Mais la partie fonctionnelle d'un diagramme peut tout autant se rapporter à un objet qu'à une opération : lorsqu'il se rapporte à un objet, le schéma indique par sa structure comment utiliser l'objet dont il est la représentation schématique. Il correspond au décalque d'une structure technique inscrite dans une matière concrète dont il modifie le format technique de manipulation. C'est une structure technique réinscrite sur un support graphique qui prescrit une action utilitaire⁶⁰⁵.

C'est pourquoi un schéma n'est pas une machine, mais un outil graphique, car il permet d'effectuer une opération cognitive qui débouche soit sur la production d'une nouvelle connaissance théorique (par exemple la production d'une démonstration dans le cadre d'une déduction théorématique), soit sur la production d'une opération pratique, c'est-à-dire d'une transformation contrôlée du monde et non de sa représentation (par exemple représenter un type de percussion pour faciliter sa compréhension et sa mise en œuvre). Mais un schéma peut aussi désigner la représentation d'une opération en tant qu'elle constitue une étape dans un processus de résolution qui mobilise différents types d'opérations et différents types d'outils au sein d'une action complexe qui les enchaînent les unes aux autres dans un ordre temporel : il se fait alors symbole d'une opération et non plus symbole d'un objet visé comme outil technique à utiliser. Il devient alors la représentation d'un geste outillé, c'est-à-dire le symbole d'une opération technique particulière.

Un diagramme possède donc deux types de parties fonctionnelles : des objets et des opérations, qui schématisent des rapports d'interaction temporellement ordonnés. Lorsqu'il articule ces deux types de représentations

⁶⁰⁵Voir par exemple les planches encyclopédiques de Leroi-Gourhan classifiant les opérations techniques élémentaires de transformations de la matière en fonction de classes définies d'outils.

graphiques, représentations d'objets et représentations d'opérations, le diagramme est une *chaîne opératoire*. Cela signifie que les parties fonctionnelles d'un diagramme sont les représentations spatiales de moments temporels qui doivent être réactualisés dans un certain ordre pour produire le diagramme comme unité d'un processus temporel complexe de résolution, c'est-à-dire comme une action coordonnée et organisée.

En outre un diagramme peut aussi désigner la représentation simplifiée d'un objet qu'on peut être conduit à devoir utiliser dans le cadre d'une action complexe. Dans ce cas, le diagramme est une représentation graphique mobilisée dans un type de document : le mode d'emploi. Il n'est dès lors plus pourvu d'un mode d'emploi, mais au service d'un mode d'emploi. Dans cette perspective, le diagramme correspond à la sériation de schémas dans un document technique mobilisant des instructions procédurales ordonnant de manipuler les parties de l'objet dont le diagramme est l'expression afin de les assembler dans un processus de construction. Exemple : la sériation des schémas annotés dans le mode d'emploi de construction d'un meuble.

L'utilisation d'un diagramme permet ainsi de répondre à un certain type de questions : comment opérer une inférence valide ? Comment construire une étagère ? Un diagramme est construit en vue de résoudre une certaine classe de problèmes. Les conventions interprétatives qui lui sont associées visent à clarifier ses règles d'utilisation pour en faciliter l'usage : elles participent à l'élaboration d'un mode d'emploi du diagramme. Si le mode d'emploi constitue une classe de document technique qu'il ne faut pas confondre avec le diagramme comme définissant une certaine classe de représentations graphiques, il n'en demeure pas moins que le diagramme possède un mode d'emploi qui correspond à l'explicitation de ses règles d'usage pour en assurer le bon fonctionnement. Un diagramme peut donc entretenir des relations avec l'espace linguistique. Dans son mode d'emploi,

un diagramme est explicité comme méthode de résolution, c'est-à-dire comme ensemble de règles à suivre suivant un certain ordre pour produire une opérationnalité effective pratique. Dans un mode d'emploi, un diagramme est ce qui permet de visualiser une méthode de construction grâce à des instructions portant sur les éléments à assembler qu'il représente.

DIFFERENCE PHENOMENOLOGIQUE : différence du dire de la science et du dire de la phénoménologie (Bachimont, 1992). Pour la science, dire l'objectivité c'est la calculer et la mesurer. Pour la phénoménologie, dire l'objectivité c'est la signifier à l'issue d'une catégorisation perceptive et linguistique.

DISPOSITIF

DISPOSITIF CONCRET : ensemble d'éléments concrets disposés dans l'espace dont la mise en fonctionnement produit un comportement temporel qui produit une fin pratique. Exemple : la montre est le dispositif concret qui permet de nous donner l'heure.

DISPOSITIF ABSTRAIT : ensemble d'informations codées dans un espace en mémoire dont la manipulation computationnelle permet le contrôle calculatoire. Tous les systèmes physiques qui opèrent les mêmes transferts d'information sont homologues et peuvent donc être soumis à la même formalisation algorithmique.

DISPOSITIF DISCRET : ensemble d'informations codées dans un espace graphique de manipulation. Un diagramme est un dispositif technique et sémiotique discret au sens où il s'agit d'un système de signes muets qui

permet d'opérer une lecture silencieuse qui débouche sur un faire. Le diagramme ne produit pas de bruit – au sens propre et au sens technique du terme – parce qu'il est opérationnellement informant (il véhicule de l'information en silence).

ENCYCLOPEDIE : rassemblement de la totalité des opérations humaines. Dans cette perspective l'opération fondamentale est l'enseignement. Car enseigner c'est faire apprendre. Schématiser c'est faire apprendre par la médiation d'un schéma. Or un schéma est le symbole d'une opération (Simondon, 2016 [1950], p. 120).

FIGURE (GRAPHIQUE) : représentation graphique qui entretient un rapport de ressemblance morphologique à son objet.

FORMAT : ce qui permet de manipuler techniquement un contenu au moyen d'un code d'enregistrement.

FORME

FORME DISCURSIVE : forme signifiante véhiculée par un énoncé langagier inscrit ou verbalisé.

FORME ESTHETIQUE : forme perçue pouvant faire l'objet d'un jugement de goût.

FORME OPERATOIRE : le formel vu depuis la manipulation sémiotique (et non depuis la manipulation algorithmique), dans une perspective pratique.

FORME ORGANIQUE : conformation d'un organisme vivant qui lui permet de réagir aux signaux de son environnement dans une boucle sensori-motrice.

FORME SYMBOLIQUE : forme culturelle qui structure un ensemble de représentations et de pratiques collectives.

FORMEL : ce qui peut être manipulé mécaniquement en vertu de sa forme dans la mesure où la reconnaissance de la forme implique l'application d'une règle de manipulation.

FORMULE/DIAGRAMME : une formule peut être diagrammatique mais n'est pas un diagramme. Dans une formule, un diagramme joue le rôle d'opérateur de simplification pour la mise en œuvre d'un calcul. Dans cette perspective, le diagramme est au service du calcul (exemple : diagramme de Feynman). Dans une formule, on recourt au caractère figural des symboles pour faciliter la mise en œuvre des calculs.

GESTE : principe d'actualisation de la connaissance (dont est porteur l'outil) en opération technique efficace. Opération courante du corps dans son commerce pratique avec les choses du monde, qui lui tombent sous la main. En ce sens, un geste implique un mouvement : il est donc une opération du corps qui implique sa mise en mouvement. C'est l'unité élémentaire, considérée abstraitement, du corps en mouvement, et plus exactement, d'une ou de plusieurs de ses parties.

GRAPHE : représentation graphique correspondant à l'abstraction d'un schéma. Un graphe est composé de sommets et d'arêtes.

GRAPHIQUE : représentation dans le plan, au moyen d'un repère constitué d'axes gradués, du rapport de deux ou plusieurs variables. Il s'exprime sémiotiquement par des formes géométriques. Si cette forme est une ligne, on l'appelle un graphe. On parle par exemple du graphe d'une fonction. Si cette ligne n'est pas une droite du plan et qu'elle délimite une zone, on l'appelle une courbe. Un graphique peut représenter des données chiffrées ou des grandeurs quantifiées.

INFORMATIQUE : traitement automatique des informations numériques discrètes. L'informatique opère sur des signes, mais qui n'ont aucun sens. Elle les manipule en fonction de leur forme syntaxique et non de leur contenu sémantique. Le sens émerge de conventions arbitraires extérieures au calcul. La manipulation informatique fait abstraction de la matière dans laquelle se réalisent ces signes, ce pourquoi on peut dire de l'informatique qu'elle est une mécanique sans substrat : c'est une mécanique des manipulations syntaxiques de codages.

INTELLIGENCE : faculté à résoudre des problèmes.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : art de résoudre des problèmes grâce à des outils techniques plus ou moins élaborés.

LEXICOGRAMME : disposition non linéaire de mots dans un espace graphique. C'est une figure car il n'a pas de contenu référentiel. Il est autoréférentiel. Il exprime des formes esthétiques signifiantes en utilisant des lettres et des mots. Il produit de la figure signifiante en assemblant des éléments discrets typographiés. Il produit de la figure avec du texte. Exemple : *Calligrammes* de Guillaume Apollinaire.

LISIVISIBILITE : par l'usage du mot-valise de lisivisibilité, nous signifions que l'écriture diagrammatique rend possible un nouveau type de lecture. Il s'agit d'un mode de lecture où le lisible et le visible ne font qu'un, et où le contenu visible ne renvoie pas à un sens idéal, mais à un schème symbolique matériellement inscrit. C'est pourquoi le noème du régime d'écriture diagrammatique est selon nous son opérationnalité. De plus, c'est le caractère orthopratique du diagramme qui donne accès à cette opérationnalité, en vertu de son iconicité.

LOGIGRAMME : symbole normalisé d'une fonction logique.

METHODE : ensemble de procédures à suivre pour obtenir un résultat.

METHODE GRAPHIQUE : système de notation plus ou moins élaboré qui permet grâce à des symboles graphiques de mettre en œuvre un projet pour le mener à bien, d'optimiser un processus. C'est l'expression graphique d'un ensemble de procédures à suivre pour obtenir un résultat.

METHODE DE CALCUL : synonyme d'algorithme.

MODALITES DIAGRAMMATIQUES (VIRTUEL, POTENTIEL, ACTUEL) :

le virtuel désigne la propriété d'une opération présente qui n'est pas effective : c'est la modalité de l'opérativité du réel en tant qu'elle est abstraite. Le virtuel, c'est l'opérativité abstraite en tant qu'elle est présentée dans un support matériel, concret et actuel. Est virtuelle l'opérativité exprimée par un verbe. L'actuel, autre face du réel, est non virtuel mais effectif : c'est l'opérativité du réel en acte. Le potentiel, distinct du virtuel et de l'actuel, est cette autre

modalité du réel qui n'est pas actuelle, mais qui peut le devenir dans l'avenir : c'est une actualité à venir, c'est-à-dire une opérationnalité en voie d'actualisation. Alors que le virtuel est un présent inactuel, le potentiel est un absent qui peut devenir présent suite à son actualisation.

Ce qu'il s'agit d'actualiser dans le cas d'un diagramme, c'est une opérationnalité, c'est-à-dire le remplissage de la visée d'une conscience opérative telle qu'elle est dirigée vers l'accomplissement d'une opération en acte. Il faut rendre possible une telle actualisation en rendant potentielle la lecture du diagramme virtuel. Il s'agit donc de potentialiser le diagramme dans les inscriptions du support matériel qui le conserve pour transformer sa virtualité en une structure technique potentielle qui rend possible sa lecture, c'est-à-dire l'actualisation en contexte de l'opération dont il est virtuellement porteur.

Pour cela, il faut premièrement doter le diagramme d'une structure notationnelle isomorphe à la structure de la situation interactive ou de la séquence d'opérations qu'il modélise. Deuxièmement, il faut que cette structure dirige la conscience qui s'en saisit vers l'opération ou la séquence d'opérations symbolisées par le diagramme, afin que cette conscience s'actualise dans une situation équivalente à la situation modélisée par la représentation diagrammatique. La fonction de la modélisation diagrammatique est de favoriser, du côté du sujet interprétant, la reconnaissance d'une situation objective équivalente à ce dont le diagramme est le modèle. La modélisation diagrammatique facilite la reconnaissance de la situation, mais pas de l'action immanente qui lui est associée.

Ce qui facilite l'action comme mise en œuvre du diagramme par le sujet interprétant qui s'en saisit, c'est sa structure technique. Or la structure du diagramme comme outil graphique est sa « potentialité représentationnelle » (Giardino, 2018). Car le diagramme n'est pas qu'un modèle, c'est aussi un outil. Or c'est la « potentialité représentationnelle » du diagramme qui est au principe

de l'actualisation de l'opération cognitive qui s'en saisit pour faire de cette opération cognitive une opération pratique actuelle dans le réel. Car cette opération cognitive, pour ne pas rester au stade de la seule compréhension théorique, mais pour se faire compréhension et conscience pratiques, doit être dirigée par une intentionnalité opérative ancrée à la fois dans la technicité du diagramme comme structure graphique et dans la situation concrète d'interaction comme ancrage matériel, dont la structure est isomorphe à la structure du diagramme, et que le sujet reconnaît grâce à la modélisation diagrammatique elle-même.

Par conséquent la compréhension qui saisit le diagramme comme structure technique est l'aiguillon qui enclenche la prise de décision de raccorder la compréhension théorique du diagramme à sa compréhension pratique, pour transformer l'isomorphie structurelle du diagramme, essentiellement spatiale, donc schématisante, en isomorphie dynamique, essentiellement temporelle, donc pleinement opérationnelle.

Or cet isodynamisme de la conscience lectrice qui actualise le diagramme dans un faire possède un rythme, car le rythme d'actualisation du diagramme est conditionné par l'attention que le sujet porte à la situation actuelle dans laquelle il est impliqué et engagé. Cette attention est un ajustement à la situation, dans la mesure où la situation est un cas variable qui enveloppe des contingences non contenues dans le modèle idéal-typique (qu'est le diagramme comme modèle) et auquel le sujet doit répondre en s'ajustant. C'est pourquoi toute actualisation diagrammatique est prise dans un circuit perception-action dont le modèle nous a été donné par la biosémiotique de von Uexküll et dont la conscience mécanologique nous a été donnée par Simondon. L'attention impliquée dans ce circuit perception-action participe ainsi de ce que V. Beaubois a décrit comme étant un « schématisme pratique de l'imagination », dont nous affirmons que

l'actualisation analogique s'opère de manière contrôlée et ajustée par la médiation d'un diagramme correctement interprété.

MODELE : dans la pratique d'une science expérimentale, un diagramme devient un véritable outil de modélisation si on peut lui associer un ensemble de mesures qui autorisent une interprétation physique de preuves formelles. Produire une preuve expérimentale, c'est donc être capable de fournir une méthode qui permet, grâce à un dispositif expérimental, d'associer à la quantification de grandeurs mesurées, les conséquences déduites d'un système hypothético-déductif originellement purement formel. Si on quantifie les conséquences déduites de la théorie grâce à un dispositif expérimental qui nous donne des mesures qu'on était capable de prédire théoriquement et qu'on vérifie expérimentalement, alors le diagramme devient un modèle.

MODULATEUR : système qui fait la synthèse d'une forme (signal d'entrée) et d'une force (énergie potentielle d'alimentation) grâce à une résistance variable (transducteur) située entre la source d'énergie et l'effecteur, qui produit en sortie un travail informé, une action organisée, etc.

MORPHISME : opération de transformation symbolisée par une flèche. Hacher est un morphisme qui transforme une vache en steak⁶⁰⁶.

MORPHOGENESE : étude du devenir des formes vivantes, esthétiques, sémiotiques, graphiques ou techniques à toutes les échelles de l'univers, dont la modélisation

⁶⁰⁶ Cf. B. Mèlès, « Pratique mathématique et lecture de Hegel », art. cit, p. 158.

et la compréhension passe par la construction et la manipulation de diagrammes, et par la mise en œuvre du raisonnement diagrammatique.

NOTATION : il faut distinguer notation, diagramme et langage. La notation ne fonctionne pas comme un diagramme mais représente comme un langage, bien qu'elle s'en distingue. En effet « noter n'est pas traiter » (Bachimont). Dans la notation, il n'y a pas forcément de productivité et de générativité. Car la notation ne fait que donner un équivalent graphique à une entité existante. En revanche il y a langage ou système graphique quand il y a une productivité propre à la notation à laquelle est associée un isomorphisme entre les structures graphiques et les structures ontologiques. Dans la langue, les mots renvoient à des entités et les combinaisons de mots en phrases renvoient aux structures des entités complexes représentées. Mais dans une notation, il manque l'homologie et la productivité. La langue naturelle, quant à elle, est capable de dire le réel, mais aussi de dire comment elle le représente : elle est donc capable d'explicitier le comment et le quoi de ce qu'elle représente. Par exemple on peut dire grâce à elle : « Paris est la capitale de la France » ; mais on peut aussi dire « Paris est un mot de 5 lettres ». Cela signifie que la langue fusionne langage et métalangage, ce pourquoi elle permet de penser et pas simplement de décrire. L'ordinateur, à la différence de la langue, n'a pas de métalangage. Un diagramme, quant à lui, n'a pas de métalangage, mais un mode d'emploi.

OPERATION : acte de transformation qui produit un résultat identique entre des objets de nature différente.

ORTHOPRATICITE : l'orthopraticité du diagramme est là pour faire voir à l'intérieur du diagramme comment reproduire le geste pratique exactement. C'est donc une

médiation entre la connaissance et l'action, qui doit guider le lecteur du diagramme dans son appropriation du geste pour le comprendre et le reproduire dans une dynamique autonome.

OUTIL : objet dont la structure matérielle détermine une opération humaine. Objet porteur de connaissance, *i.e.* objet technique qui programme le geste.

PHENOMENOGRAPHIE : description des formes sémiotiques d'expression qui apparaissent à la conscience dans un espace sémiotique de présentation suite au formatage d'un contenu dans un langage de modélisation graphique.

PHENOMENOLOGIE : description de ce qui apparaît à la conscience suite à une catégorisation perceptive et linguistique.

PHYSIQUE : mécanique avec substrat des transferts d'informations dans les systèmes matériels.

PICTOGRAMME : représentation graphique figurative et/ou schématique qui peut être utilisée dans un cartogramme, une représentation graphique de données ou une méthode graphique afin de représenter une classe d'objets, un caractère statistique, une classe d'opérations ou d'actions.

POSTULAT

POSTULAT DE RELATIONNALITE : « La véritable relation est partie intégrante de l'être⁶⁰⁷ ». À lumière de l'histoire des sciences au 20^e siècle et de l'épistémologie du 21^e siècle, on peut constater la justesse de l'intuition de Simondon. En effet, Paul Dirac, qui a opéré la quantification de l'électromagnétisme, a eu l'idée à l'origine de la physique nucléaire. Dans la découverte de Max Planck et dans le mot quantique, il y a l'idée d'intégralité. L'énergie est quantifiée et n est un entier positif dans la formule : $E = hv$. Dirac s'est alors posé la question suivante : comment dire qu'un nombre est un entier positif, en vertu de la formule de Planck ? Sa réponse a été de dire que ce qu'avait trouvé Heisenberg dans la mécanique matricielle, c'était en fait des nouveaux nombres : les q-numbers ou nombres quantiques⁶⁰⁸. Ces nombres permettent en effet de décrire la manière dont se produisent les sauts quantiques, en interprétant les propriétés physiques des particules comme des matrices qui évoluent dans le temps. Or ces nombres ne commutent pas entre eux. Au lieu de réécrire le champ électromagnétique avec des nombres complexes, Dirac l'a fait avec ces nombres quantiques et il s'est rendu compte que grâce à eux il démontrait les coefficients A et B d'Einstein d'émission et d'absorption des atomes (qui avaient été postulés par Einstein dans une pure expérience de pensée mais qui n'étaient pas encore démontrés). Il a aussi découvert de cette façon que le nombre de photons n'était plus conservé, ce qui signifiait qu'on pouvait transformer certains corps qui ont un nombre atomique en d'autres corps, inaugurant le début de la physique nucléaire.

⁶⁰⁷ G. Simondon, « Analyse des critères de l'individualité », in *L'individuation, op. cit.*, p. 523.

⁶⁰⁸ O. Darriguol, *From c-Numbers to q-Numbers: The Classical Analogy in the History of Quantum Theory*, Berkeley, University of California Press, 1992.

En discutant avec Freeman Dyson au début des années 1970 à l'IAS de Princeton, Hugh Montgomery s'est rendu compte que la densité des points des zéros de la ligne critique de la fonction ζ de Riemann était la même que celle des paires de valeur d'énergie dans la théorie des matrices aléatoires de Dyson, un modèle statistique des niveaux d'énergie émis par les particules en physique atomique. Si on étudie des milliers de particules, on se rend compte que le graphique des niveaux d'énergie des atomes lourds (comme l'uranium) ressemble aux différentes notes d'un instrument. Plus le noyau s'agite, plus les niveaux d'énergie de l'atome d'uranium s'espace, comme les zéros de la ligne de Riemann : ils sont quasi réguliers. Montgomery et Dyson ont ainsi pu montrer que les niveaux d'énergie obéissent aux mêmes statistiques que celles de la distribution des zéros sur la ligne critique et donc qu'il y a une correspondance secrète entre les atomes de l'arithmétique (les nombres premiers) et les atomes de la nature.

Toutes ces découvertes nous ont ainsi révélé que notre conception ordinaire du nombre est étriquée, trop pauvre, et que nous avons besoin de l'élargir et de permettre cette non-commutativité (étudiée depuis quarante ans par Alain Connes avec les algèbres dites d'opérateurs). Ces sauts quantiques sont philosophiquement à la mesure de notre concept d'opération, puisqu'il est pourvu d'une propriété relationnelle en vertu de notre postulat ontologique simondonien de départ qui pose la réalité de la relation et dont on peut constater qu'il n'est pas arbitraire, puisqu'il est justifié par la physique atomique contemporaine.

POSTULAT D'ANALOGICITE : « La relation entre deux relations est elle-même une relation⁶⁰⁹ ».

POSTULAT DE REFLEXIVITE : synthèse du postulat de relationnalité et du postulat d'analogicité. Énoncé : l'usage de la méthode analogique entre les différents régimes d'individuation présuppose une analogie réflexive entre la genèse des objets et la genèse de la pensée. Autrement dit : le sujet connaissant incorpore sous forme de structure virtuelle le schématisme opératoire d'un objet connu (pris comme paradigme) qu'il transpose vers un objet inconnu (pris comme objet de recherche). Voir l'exemple du Sophiste. Or cette structure virtuelle est ce que conserve le diagramme. Il la conserve parce que cette structure virtuelle est une opération engrammée. Est virtuel ce qui est conservé statiquement mais possède un caractère dynamique. Est virtuelle une transformation en voie d'actualisation. Pour qu'il y ait actualisation, il faut un germe : ce germe, dans le cas du diagramme, est le sujet interprétant qui lit le diagramme comme forme dynamique virtuelle pour l'actualiser dans une transformation effective, c'est-à-dire dans l'acte d'une opération de lecture qui est un faire. Le diagramme est médiation entre le monde et sa représentation, pour reconduire de la représentation du monde à l'inscription du sujet dans le monde afin de le transformer, dans la pleine autonomie d'une libération contrôlée.

⁶⁰⁹ G. Simondon, *L'individuation, op. cit.*, p. 83.

PREUVE : manière possible de démontrer un résultat.

PREUVE INFORMATIQUE : solution à un problème à laquelle on peut parvenir de façon effective grâce à l'exécution d'un algorithme. Par conséquent, toute preuve n'est pas un algorithme dans la mesure où certaines solutions à des problèmes ne sont pas accessibles par voie computationnelle.

PREUVE MATHEMATIQUE : preuve théorique de l'existence d'une solution à un problème.

PREUVE RHETORIQUE : argumentation mobilisée pour soutenir la vérité d'une assertion et emporter la conviction.

PRINCIPE D'EQUIVALENCE FONCTIONNELLE : principe d'équivalence des méthodes. Énoncé : un même résultat peut être obtenu à partir de fonctionnements ou de structures différentes. Exemple : le dispositif d'une horloge à poids (poids + roue motrice + remontoir + tambour) est équivalent à un treuil de carrière. Une sonnette est équivalente à une horloge à entretien électrique. Le principe de fonctionnement dans ce dernier exemple est : l'établissement et la rupture alternatives d'un courant dans un circuit à partir d'une action par contact. L'équivalence fonctionnelle est donc : balancier / horloge = opérateur humain / sonnette. C'est une analogie opératoire, comme dans l'exemple du *Sophiste*.

PROGRAMME/DIAGRAMME : un programme n'est pas un diagramme, car c'est une liste d'instructions qui pilote l'exécution d'un calcul qui n'est pas effectué par un être humain. Pour que le programme devienne un diagramme, le dispositif de

calcul doit être analogique (ou iconique) et l'interprétation des symboles doit être opérée par un être humain dont les opérations de lecture sont congruentes aux opérations figurées par le diagramme.

RECETTE/DIAGRAMME : à quelles conditions une liste peut-elle devenir un diagramme ? Si une liste d'ingrédients ne fait pas une recette, une recette peut-elle être considérée comme un diagramme ? Quelle est l'essence d'une recette ? Une recette de cuisine, par exemple, est généralement constituée d'ingrédients quantifiés en fonction du nombre de personnes pris en considération pour la consommation de la préparation. Ces ingrédients sont préparés grâce à des ustensiles qui permettent d'accomplir un certain nombre d'opérations mécaniques de transformations sur les ingrédients, qui peuvent aussi faire l'objet de transformations thermodynamiques et mécaniques au moyen de dispositifs de chauffe ou d'appareils électroménagers. Ces opérations de transformations, qu'elles soient mécaniques ou thermodynamiques, doivent toujours respecter un certain ordre et obéir à des temps de préparation variables. Le respect des quantités, de l'exécution des opérations de préparation, de l'ordre d'assemblage des ingrédients ainsi que des temps de cuisson requis constituent les conditions d'une bonne préparation d'une recette réussie. La liste ordonnée d'instructions portant sur les opérations à accomplir sur les ingrédients peut-elle dès lors être identifiée à un diagramme ? Non si le diagramme est défini comme une machine sémiotique. Car dans le cas de la recette de cuisine, c'est plutôt l'agencement de l'ensemble des ingrédients aux gestes du cuisinier, aux ustensiles et aux appareils électroménagers qu'il utilise et fait fonctionner qui doit plutôt être qualifié de diagrammatique. Ce qui autorise la qualification de diagrammatique d'un tel agencement, c'est qu'il articule des éléments sémiotiques (l'ensemble des signes ordonnés de cette liste qu'est la recette en tant qu'elle est écrite) à des éléments non sémiotiques

(l'ensemble formé par les objets techniques, les supports et l'opérateur humain accomplissant la préparation), car l'agencement, en tant qu'articulation d'éléments sémiotiques et non sémiotiques, constitue bien une espèce de machine dans la mesure où elle conduit à la production d'un résultat escompté à l'issue duquel quelque chose a été produit au bout d'une chaîne de production. On a affaire à un agencement qui est certes diagrammatique mais qui n'est pas un diagramme dans la mesure où il ne produit la résolution d'aucun problème, sinon celui de la faim des personnes qui consommeront la préparation.

REPRESENTATION

REPRESENTATION D'UNE OPERATION : schéma qui simplifie la représentation d'une interaction produisant une transformation.

REPRESENTATION OPERATOIRE : représentation qui permet de produire l'objet dont elle est la représentation. Une représentation opératoire est donc une méthode de production. Elle suppose un mode d'emploi qui agit comme une fiche de lecture prescriptive. On peut distinguer deux grands types de représentations opératoires : celles qui sont tournées vers la construction d'un objet et celles qui sont tournées vers l'accomplissement d'un processus. Une représentation opératoire est donc la représentation d'une opération munie d'une sémantique opératoire explicitée dans un mode d'emploi qui permet au sujet d'interpréter le diagramme comme système de schémas ordonnés dans un espace graphique, dont l'actualisation par le sujet qui le lit conduit à un ensemble d'opérations temporelles exécutées qui produisent le résultat attendu.

RESEAU/DIAGRAMME : un réseau est le support de relations réelles dont un graphe peut être la représentation. Un réseau informatique n'est pas le support d'un diagramme, mais le support de relations dynamiques entre des terminaux reliés par des programmes : c'est un tableau dynamique (Bachimont, 2004). Cependant il peut être figuré par un graphe. Un graphe peut en effet être la représentation schématique et graphique de parcours de calculs effectués entre les nœuds et les sommets d'un réseau réel de machines computationnelles interconnectées : Internet. Un graphe est donc un type de représentation qui représente soit des données (datavisualisation), soit des relations réelles (carte). En ce sens, c'est un schéma de données ou un schéma de relations réelles entre des objets.

SCHEMA/SCHEMATISATION : la schématisation précède la diagrammatisation, car elle a pour fonction de sélectionner les éléments essentiels d'une situation afin d'en dégager la structure. La schématisation désigne une opération de dé-densification de l'image qu'on se fait d'une situation ou d'un objet dans une relation de communication, pour en extraire les traits saillants, afin d'en obtenir une représentation stable simplifiée. Le schéma vise l'efficacité de la transmission d'un contenu. En art et en design, on appelle cette représentation un *croquis* ; dans les sciences et les techniques, on l'appelle un *schéma*. Contrairement au croquis, la visée du schéma n'est pas esthétique, mais pédagogique : le schéma propose de représenter un objet, un ensemble, une situation ou encore l'essentiel d'un propos, pour synthétiser de façon synoptique les éléments d'une totalité – qu'on doit considérer comme le sujet sur lequel on souhaite communiquer – à travers une représentation simplifiée, afin de rendre possible une compréhension immédiate de ce qui est schématisé. Cette compréhension doit pouvoir s'opérer par l'inspection du regard. Le schéma est donc une figure de la synthèse qui s'exprime à travers un nombre fini d'éléments graphiques réunis dans une

représentation unifiée : ce peut être le schéma d'un appareil comme le smartphone représenté à travers un dessin technique, ce peut être le schéma d'une situation géopolitique représentée à travers une carte d'atlas, ce peut être le schéma récapitulatif d'un propos représenté à travers une diapositive d'un document Powerpoint ou Beamer, ce peut être aussi le schéma d'une cellule dans un manuel de biologie, ou encore une planche représentant le cycle de l'eau dans une encyclopédie. Tous ces exemples, hormis celui du dessin technique, montrent qu'un schéma est produit dans une perspective compréhensive : il s'agit de *faire comprendre* en communiquant à travers une expression figurative (dans le cas d'un croquis artistique) ou en jouant sur la spatialisation d'informations essentielles concernant un sujet d'étude ou sur la représentation simplifiée des parties d'un objet, d'un ensemble ou d'un système sur lesquels on souhaite transmettre des connaissances. Autrement dit, le schéma est écrit pour être compris, c'est-à-dire rendre possible la transmission d'un contenu. Il n'est pas tracé pour produire un résultat ou faire faire quelque chose.

TABLEAU : représentation graphique composée de lignes et de colonnes. Il est constitué de cellules dans lesquelles peuvent être inscrites des données chiffrées et des caractères. Il peut servir de base pour une représentation graphique de données ou fournir une structure graphique de présentation d'une classification. Le tableau graphique peut être un diagramme, car il est originellement une machine graphique de calcul qui mobilise un interprétant humain pour le manipuler. C'est aussi un modèle, car il rend possible une prédiction, comme le montre le tableau de Mendeleïev, qui a permis de prédire l'existence de l'uranium avant sa découverte effective. Un tableau est potentiellement mécanisable, ce dont témoignent les tableurs de l'ère computationnelle.

TECHNIQUE : ce qui par sa structure matérielle prescrit de manière non déterminante la réalisation d'une opération humaine possible, *i.e.* une synthèse geste-outil dans un acte efficace. Une structure technique est un invariant matériel qui donne le schéma suffisant pour la répétition d'une même opération.

THEORIE DES CATEGORIES : théorie unificatrice des sciences mathématiques séparées, qui rend possible un encyclopédisme de la connaissance mathématique.

TRANSDUCTION : en bactériologie, elle désigne le processus par lequel l'ADN est transféré d'une bactérie à une autre par un virus. C'est l'ADN étranger introduit dans le génome d'une cellule hôte via un vecteur viral. En technologie, un transducteur est une « résistance modulable interposée entre une énergie potentielle et le lieu d'actualisation de cette énergie⁶¹⁰ ».

VIE PRATIQUE : un diagramme devient un outil de modélisation pratique lorsqu'il quitte le monde de la science pour s'occuper de l'objectivité phénoménologique de la vie humaine. Les premiers diagrammes correspondent aux représentations les plus anciennes qu'on connaît de scènes se rapportant à des contextes pratiques de la vie humaine. Dès lors que l'homme a commencé à représenter des scènes de la vie pour communiquer son rapport à l'ordre social ou naturel, il a diagrammatisé, parce qu'il a exprimé de façon synoptique un processus temporel périodique au moyen d'un ensemble fini de signes disposés dans un espace de présentation, cela, afin de schématiser un cycle temporel contraint par les nécessités de la vie pratique et sociale : un rite, une technique, une ruse, un phénomène périodique manifesté dans le cours de la nature (lorsque le loisir lui permettait d'être en disposition

⁶¹⁰ G. Simondon, *Du mode d'existence des objets techniques*, *op. cit.*, p. 197.

contemplative), etc. Le diagrammatique est donc pré-grammatical, au sens où il concerne la schématisation pré-linguistique et pré-alphabétique, c'est-à-dire antérieure à toute discrétisation lettrée du symbole schématique. Le diagrammatique a toujours arraisonné le temps pour le maîtriser dans une synoptique intelligible.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET VIDEOGRAPHIQUES**BIBLIOGRAPHIE ET VIDEOGRAPHIE DES ŒUVRES CITEES**

Alunni Charles, « De l'écriture de la mutation à la mutation de l'écriture : de Galileo Galilei et Leonardo da Vinci au "technogramme" », in François Nicolas (dir.), *Les mutations de l'écriture*, Paris, Éditions de la Sorbonne, coll. « Logique, langage, sciences, philosophie », 2013, p. 123-137.

Artin M., A. Grothendieck et J.-L. Verdier (dir.), *Théorie des topos et cohomologie étale des schémas*, Berlin ; New York, Springer, coll. « Lecture Notes in Mathematics », 1972, vol. 3.

Auroux Sylvain, *La révolution technologique de la grammatisation : introduction à l'histoire des sciences du langage*, Liège, Mardaga, coll. « Philosophie et langage », 1994.

Bachelard Gaston, *Le nouvel esprit scientifique* (1934), 7^e éd., 4^e tirage, Paris, Presses universitaires de France, 2009.

Bachelard Gaston, *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Bibliothèque de philosophie contemporaine », 1951.

Bachelard Gaston, *L'expérience de l'espace dans la physique contemporaine*, Paris, Félix Alcan, coll. « Bibliothèque de philosophie contemporaine », 1937.

Bachelard Gaston, *La valeur inductive de la relativité*, Paris, J. Vrin, 1929.

Bachimont Bruno, *Patrimoine et numérique : technique et politique de la mémoire*, Bry-sur-Marne, INA, coll. « Médias et humanités », 2017.

Bachimont Bruno, « Le numérique comme support de la connaissance : entre matérialisation et interprétation », in G. Gueudet et L. Trouche (dir.), *Ressources vives. Le travail documentaire des professeurs en mathématiques*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, 2010.

Bachimont Bruno, « Formal Signs and Numerical Computation: Between Intuitionism and Formalism. Critique of Computational Reason », in H. Schramm, L. Schwarte, J. Lazardzig (eds.), *Instruments in Art and Science. On the Architectonics of Cultural Boundaries in the 17th Century*, Berlin-New York, Walter de Gruyter, 2008, p. 362-382.

- Bachimont Bruno, *Ingénierie des connaissances et des contenus : le numérique entre ontologies et documents*, Paris, Hermes Science Publications, coll. « Science informatique et SHS », 2007.
- Bachimont Bruno, *Arts et sciences du numérique : ingénierie des connaissances et critique de la raison computationnelle*, mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université de technologie de Compiègne, 2004.
- Bachimont Bruno, « Intelligence artificielle et écriture dynamique : de la raison graphique à la raison computationnelle », in J. Petitot & P. Fabbri (dir.), *Au nom du sens*, Paris, Grasset, 2000, p. 290-319.
- Bachimont Bruno, « Du texte à l'hypotexte : les parcours de la mémoire documentaire », in C. Lenay et V. Havelange (dir.), *Mémoire de la technique et techniques de la mémoire*, Toulouse, Érès, coll. « Technologies, idéologies et pratiques », 2000.
- Bachimont Bruno, « Bibliothèques numériques audiovisuelles : des enjeux scientifiques et techniques », *Document numérique*, vol. 2, n° 3-4, 1998, p. 219-242.
- Bachimont Bruno, « L'artéfacture entre herméneutique de l'objectivité et de l'intersubjectivité : un projet pour l'intelligence artificielle », in J.-M. Salanskis, F. Rastier et R. Sheps (dir.), *Herméneutique : textes, sciences*, Paris, Presses universitaires de France, 1997, p. 301-330.
- Bachimont Bruno, *Herméneutique matérielle et Artéfacture : des machines qui pensent aux machines qui donnent à penser. Critique du formalisme en intelligence artificielle*, Thèse de doctorat en épistémologie, Palaiseau, École polytechnique, 1996.
- Bachimont Bruno, *Le contrôle dans les systèmes à base de connaissances : contribution à l'épistémologie de l'intelligence artificielle* (1992), Paris, Hermes Science Publications, coll. « Langue, raisonnement, calcul », 1994.
- Bacon Francis, *Novum Organum*, M. Malherbe et J.-M. Pousseur (dir.), Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », 2010.
- Bakhtine Mikhaïl, *Esthétique et théorie du roman* (1978), D. Olivier (trad.), Paris, Gallimard, coll. « Tel », n° 120, 1993.
- Barksdale James B., « Sets and Randolph Diagrams », Western Kentucky University, Bowling Green, 1970. 19 p.

- Barthélémy Jean-Hugues, *Simondon ou l'encyclopédisme génétique*, Paris, Presses universitaires de France, 2008.
- Barthélémy Jean-Hugues et Vincent Bontems, « Relativité et réalité : Nottale, Simondon et le réalisme des relations », *Revue de Synthèse*, vol. 122, n° 1, 2001, p. 27-54.
- Beaubois Vincent, *La zone obscure du design : une pensée des pratiques de conception (d')après Gilbert Simondon*, Thèse de doctorat en philosophie, Paris 10, 2019.
- Beaubois Vincent, « Ethnographies du design. Vers une diagrammatisation de la conception », *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, vol. 64, n° 2, Les éditions de l'EHESS, 2015, p. 48-63. <https://doi.org/10.4000/tc.7558>
- Beaubois Vincent, « Un schématisme pratique de l'imagination », *Appareil*, n° 16, Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord, 2015 (DOI : 10.4000/appareil.2247).
- Beckmann Johann, « Projet de technologie générale », in G. Carnino, L. Hilaire-Pérez et J. Hooek (dir.), *La technologie générale*, J. Mertens (trad.), Rennes, Presses Universitaires de Rennes, coll. « Histoire », 2017.
- Bellucci Francesco, Amirouche Moktefi et Ahti-Veikko Pietarinen, « Introduction : History and Philosophy of Logical Notation », *History and Philosophy of Logic*, vol. 39, n° 1, Taylor & Francis, 2018, p. 1-2.
- Beniger James R. et Dorothy L. Robyn, « Quantitative Graphics in Statistics : A Brief History », *The American Statistician*, vol. 32, n° 1, 1978, p. 1-11.
- Berry Gérard, *Penser, modéliser et maîtriser le calcul informatique*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 208, 2009.
- Berthoz Alain, *La simplicité*, Paris, Odile Jacob, 2009.
- Bertin Jacques, *La graphique et le traitement graphique de l'information* (1977), Bruxelles, Zones Sensibles, 2017.
- Bocquet Martine, « Prénance du carré sémiotique ou la trace de l'homme : une anthropologie », *Revue française des sciences de l'information et de la communication*, n° 11, Société Française de Sciences de l'Information et de la Communication, 2017 (DOI : 10.4000/rfsic.3054).
- Boirel René, *Théorie générale de l'invention*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Bibliothèque de philosophie contemporaine », 1961.

- Bontems Vincent, « Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon. Individuation, Technique, et Histoire », *Appareil*, n° 2, Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord, 2008 (DOI : 10.4000/appareil.595).
- Boole George, *Les lois de la pensée* (1854), S. B. Diagne (trad.), Paris, J. Vrin, coll. « Mathésis », 1992.
- Bottéro Jean, *Mésopotamie : l'écriture, la raison et les dieux*, Paris, Gallimard, coll. « Bibliothèque des histoires », 1994.
- Bourdieu Pierre, *Le sens pratique*, Paris, Éditions de Minuit, coll. « Le Sens commun », 1980.
- Boutroux Pierre, « L'objet et la méthode de l'analyse mathématique », *Revue de métaphysique et de morale*, vol. 21, n° 3, Presses universitaires de France, 1913, p. 307-328.
- Bouveresse Jacques, *Prodiges et vertiges de l'analogie : de l'abus des belles-lettres dans la pensée*, Paris, Raisons d'agir, 1999.
- Brahmi Frédéric, *Introduction au Traité de la nature humaine de David Hume*, Paris, Presses universitaires de France, 2003.
- Bredenkamp Horst, *Les coraux de Darwin : premiers modèles de l'évolution et tradition de l'histoire naturelle*, C. Joschke (trad.), Dijon, Les Presses du réel, coll. « Œuvres en sociétés », 2008.
- Bredenkamp Horst, *Théorie de l'acte d'image : conférences Adorno, Francfort 2007*, F. Joly et Y. Sintomer (trad.), Paris, La Découverte, coll. « Collection Politique et sociétés », 2015.
- Bulletin de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*, Numéro spécial dédié à Bernard Roy (1934-2017), Février 2019, n° 40.
- Byrne Oliver, *The First Six Books of the Elements of Euclid in Which Coloured Diagrams and Symbols Are Used Instead of Letters for the Greater Ease of Learners* (1847), Köln, Taschen, coll. « Bibliotheca universalis », 2017.
- Canguilhem Georges, *La connaissance de la vie* (1965), Paris, J. Vrin, coll. « Bibliothèque des textes philosophiques », 1992.
- Cassirer Ernst, *La philosophie des formes symboliques*, Paris, Éditions de Minuit, coll. « Le sens commun », 1972. 3 vol : *La philosophie des formes symboliques. 1*,

Le langage ; La philosophie des formes symboliques. 2, La pensée mythique ; La philosophie des formes symboliques. 3, La phénoménologie de la connaissance.

Cassou-Noguès Pierre, « Gödel et la thèse de Turing », *Revue d'histoire des mathématiques*, vol. 14, n° 1, 2008, p. 77-111.

Cassou-Noguès Pierre, *Gödel*, Paris, Les Belles Lettres, 2004.

Cassou-Noguès Pierre, « Conscience et réflexivité dans la philosophie mathématique de Cavailles », *Methodos. Savoirs et textes*, n° 1, Savoirs textes langage (UMR 8163), 2001 (DOI : 10.4000/methodos.55).

Cassou-Noguès Pierre, *De l'expérience mathématique : essai sur la philosophie des sciences de Jean Cavailles*, Paris, J. Vrin, coll. « Problèmes et controverses », 2001.

Chapman Peter, Gem Stapleton, Amirouche Moktefi, Sarah Perez-Kriz et Francesco Bellucci (eds.), *Diagrammatic Representation and Inference : 10th International Conference, Diagrams 2018, Edinburgh, UK, June 18-22, 2018, Proceedings*, Springer International Publishing, « Lecture Notes in Artificial Intelligence », 10871, 2018.

Châtelet Gilles, « Géométrie et philosophie de la nature : la balance dialectique d'Argand-Hamilton », in O. Bloch (dir.), *Philosophies de la nature*, Paris, Éditions de la Sorbonne, coll. « Philosophie », 2019, p. 271-278.

Châtelet Gilles, *Les enjeux du mobile : mathématique, physique, philosophie*, Paris, Seuil, coll. « Des Travaux », 1993.

Châtelet Gilles, Charles Alunni et Catherine Paoletti, *L'enchantement du virtuel : mathématique, physique, philosophie*, Paris, Éditions Rue d'Ulm, 2016.

Chauviré Christiane, *L'œil mathématique : essai sur la philosophie mathématique de Peirce*, Paris, Kimé, coll. « Philosophie en cours », 2008.

Chauviré Christiane, « Schématisation et analyticités chez C. S. Peirce », *Archives de Philosophie*, vol. 50, n° 3, Centre Sèvres – Facultés jésuites de Paris, 1987, p. 413-437.

Chazelle Bernard, *L'algorithmique et les sciences*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 229, 2012.

- Chevalier Jean-Marie. « Animal, trop animal. Remarques sur l'usage de la sémiotique dans *Comment pensent les forêts ?* d'Eduardo Kohn », *Cahiers philosophiques*, vol. 153, n° 2, 2018, p. 101-112
- Chevalier Jean-Marie, « Design et sémiotique », *Cahiers philosophiques*, vol. 150, n° 3, J. Vrin, 2017, p. 153-159.
- Connes Alain, *Noncommutative geometry*, San Diego, Academic Press, 1994.
- Corteel Sylvie, *Diagrammes de Ferrers décorés*, mémoire d'Habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Diderot 7, 2010.
- Coumet Ernest, *Œuvres d'Ernest Coumet, tome 1*, T. Martin et S. Roux (éd.), Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, 2016.
- Crevoisier Michaël, Fabien Ferri et Carole Widmaier (dir.), « Rencontre autour de Bruno Bachimont », *Philosophique*, Hors-série 2020, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. « Annales littéraires », n° 1009, 2020.
- Darwin Charles, *Le corail de la vie : carnet B, 1837-1838*, M. Rovere (éd.), Paris, Payot & Rivages, coll. « Rivages poche », 2008.
- Darwin Charles, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life*, London, John Murray, 1859.
- De Morgan Augustus, « Operation », in *The Penny Cyclopaedia of the Society for the Diffusion of Useful Knowledge*, London, Charles Knight & Co., 1840, vol. XVI, p. 442-446.
- De Toffoli Silvia et Valeria Giardino, « An Inquiry into the Practice of Proving in Low-Dimensional Topology », in G. Lolli, M. Panza et G. Venturi (eds.), *From Logic to Practice: Italian Studies in the Philosophy of Mathematics*, Cham, Springer International Publishing, coll. « Boston Studies in the Philosophy and History of Science », 2015, p. 315-336.
- Debuiche Valérie, « La notion d'expression et ses origines mathématiques », *Studia Leibnitiana*, vol. 41, n° 1, Franz Steiner Verlag, 2009, p. 88-117.
- Deldicque Timothée et Victor Petit, « La recherche en design avant la "recherche en design" », *Cahiers COSTECH*, n° 1, 2017 (en ligne : <http://www.costech.utc.fr/CahiersCOSTECH/spip.php?article16>).

- Deleuze Gilles, *Logique du sens* (1969), Paris, Éditions de Minuit, coll. « Critique », 2009.
- Deleuze Gilles, *Empirisme et subjectivité : essai sur la nature humaine selon Hume* (1953), Paris, Presses universitaires de France, 2003.
- Deleuze Gilles, *Francis Bacon : logique de la sensation* (1981), 4^e éd., Paris, Éditions de la Différence, coll. « La vue le texte », n° 1, 1996.
- Deleuze Gilles, *Différence et répétition*, Paris, Presses universitaires de France, 1968.
- Deleuze Gilles et Félix Guattari, *Capitalisme et schizophrénie 2 : Mille plateaux*, Paris, Éditions de Minuit, coll. « Critique », 1980.
- Deleuze Gilles et Félix Guattari, *Capitalisme et schizophrénie 1 : L'Anti-Œdipe*, Paris, Éditions de Minuit, coll. « Critique », 1972.
- Dennett Daniel C., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, New York ; London, Simon & Schuster, 1995.
- Desachy Bruno, « Formaliser le raisonnement chronologique et son incertitude en archéologie de terrain », *Cybergeog : European Journal of Geography*, CNRS-UMR Géographie-cités 8504, avril 2012 (DOI : 10.4000/cybergeog.25233).
- Descartes René, *Méditations métaphysiques (suivi de) Objections et réponses, I à VI*, Paris, Gallimard, coll. « Œuvres complètes, t. IV-1 » ; Tel, n° 423, 2018.
- Descartes René, *Premiers écrits (suivi de) Règles pour la direction de l'esprit*, Paris, Gallimard, coll. « Œuvres complètes, t. I » ; Tel, n° 415, 2016.
- Descartes René, *Discours de la méthode (suivi de) La dioptrique, Les météores et La géométrie...*, Paris, Gallimard, coll. « Œuvres complètes, t. III » ; Tel, n° 364, 2009.
- Desclès Jean-Pierre, *Opérateurs-opérations : méthodes intrinsèques en informatique fondamentale, applications aux bases de données et à la linguistique*, Thèse de doctorat d'État ès sciences, Université Paris 7, 1981.
- Desclès Jean-Pierre, « De la notion d'opération à celle d'opérateur ou à la recherche de formalismes intrinsèques », *Mathématiques et Sciences humaines*, vol. 76, 1981, p. 5-32.
- Detienne Marcel (dir.), *Les savoirs de l'écriture en Grèce ancienne*, Lille, Presses universitaires de Lille, 1988.

- Diderot Denis, A. Louis et G. F. Venel, « Opération », in *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris, 1765, vol. 11, p. 497-501.
- Djindjian François et Bruno Desachy, « Sur l'aide au traitement des données stratigraphiques des sites archéologiques », *Histoire & Mesure*, vol. 5, n° 1, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1990, p. 51-88.
- Dondero Maria Giulia, « Diagramme et parcours visuels de la démonstration », *Actes Sémiotiques*, vol. 114, Université de Limoges, 2011 (en ligne : <https://www.unilim.fr/actes-semiotiques/index.php?id=2775>).
- Dufourcq Annabelle, *Merleau-Ponty : une ontologie de l'imaginaire*, Dordrecht ; London ; New York, Springer, coll. « Phaenomenologica », vol. 204, 2012.
- Duns Scot Jean, *Sur la connaissance de Dieu et l'univocité de l'étant*, O. Boulnois (trad.), Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », n° 90, 1988.
- Dupuy Jean-Pierre, « Quand les technologies convergeront », *Revue du MAUSS*, vol. 23, n° 1, La Découverte, 2004, p. 408-417.
- Durand-Gasselien Maxime, *Mise au point d'un dispositif de mesure d'impédance complexe, micro-onde et cryogénique*, mémoire présenté au département de physique en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences, Sherbrooke, Québec, Canada, 2 novembre 2018 (en ligne : <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/14186>).
- Durand-Richard Marie José, « Genèse de l'Algèbre symbolique en Angleterre : une influence possible de John Locke », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 43, n° 2, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1990, p. 129-180.
- Dynkin Evgenii, « Classification of the simple Lie groups », *Matematicheskii Sbornik*, vol. 18, n° 2, 1946, p. 347-353.
- Einstein Albert, *La géométrie et l'expérience*, M. Solovine (trad.), Paris, Gauthier-Villars, 1921.
- Ellingham Harold Johann Thomas, « Transactions and Communications », *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 63, n° 5, 1944, pp. 125-160.
- Espinas Alfred, *Les origines de la technologie : étude sociologique*, Paris, Félix Alcan, 1897.
- Feiersinger Luisa, Kathrin Friedrich et Moritz Queisner (eds.), *Image – Action – Space*, Berlin, De Gruyter, 2018.

- Ferri Fabien, « Le langage diagrammatique au-delà de la différence phénoménologique », in L. Boi & C. Lobo (eds.), *When Form Becomes Substance*, Cham, Birkhäuser – Springer Nature, 2022.
- Ferri Fabien, « De la pratique mathématique à la philosophie des pratiques : le geste diagrammatique entre théorème et morphogenèse », *Metodo*, vol. 9, n° 1, 2021, p. 97-118.
- Ferri Fabien, « Comment et pourquoi le diagrammatique transforme-t-il l'histoire de l'écriture ? », *Cahiers philosophiques*, vol. 163, n° 4, 2020, p. 47-59.
- Ferri Fabien, « De la raison graphique à la raison computationnelle : une brève préhistoire de l'intelligence artificielle », *Interfaces numériques*, vol. 9, n° 1, 2020.
- Ferri Fabien, « Matérialiser le schème et dynamiser le schéma : penser et agir par le diagramme », *Philosophique*, Hors-série 2020, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. « Annales littéraires », n° 1009, 2020, p. 33-44.
- Ferri Fabien, « Unveiling Darwin's Theory of Evolution through the Epistemological Study of his Diagram », in P. Chapman et al. (eds.), *Diagrammatic Representation and Inference. 10th International Conference, Diagrams 2018, Edinburgh, UK, June 18-22, 2018, Proceedings*, Springer, LNAI 10871, 2018, p. 791-795.
- Ferri Fabien, « Technique, science, philosophie : les conditions d'exercice de l'analogie valide », *Philosophique 2017*, n° 20, Besançon, Presses Universitaires de Franche-Comté, coll. « Annales Littéraires », n° 969, 2017, p. 79-94.
- Ferri Fabien, « Recension de : D. Lelarge, *L'encyclopédie sociale d'Otto Neurath : la raison visuelle*, Paris, L'Harmattan, 2009 », Notice n° 3334 du *Système d'information en philosophie des sciences*. URL : <https://sips.univ-fcomte.fr/>
- Ferri Fabien, « Recension de : H. Sinaceur, *Cavaillès*, Paris, Les Belles Lettres, 2013 », Notice n° 3027 du *Système d'information en philosophie des sciences*. URL : <https://sips.univ-fcomte.fr/>
- Ferri Fabien, *Sensibilité, liberté, nouveauté : essai sur le statut de l'expérience selon James*, mémoire de master 2 en philosophie sous la direction de F. Brahami, Besançon, Université de Franche-Comté, 2010.
- Ferri Fabien, *Le statut des relations chez Hume*, mémoire de master 1 en philosophie sous la direction de F. Brahami, Besançon, Université de Franche-Comté, 2009.

- Feynman R. P., « Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics », *Physical Review*, vol. 76, n° 6, American Physical Society, 1949, p. 769-789.
- Foucault Michel, cours inédit du 23 février 1983, *Magazine littéraire*, n° 435, octobre 2004.
- Foucault Michel, *Les mots et les choses : une archéologie des sciences humaines*, Paris, Gallimard, coll. « Bibliothèque des sciences humaines », 1966.
- Franchette Florent, « La thèse de l'hyper-calcul : enjeux et problèmes philosophiques », *Philosophia Scientiae*, vol. 16, n° 3, 2012, p. 17-38.
- Frege Gottlob, *Écrits logiques et philosophiques*, C. Imbert (trad.), Paris, Seuil, coll. « Points », n° 296, 1994.
- Gaffiot Félix, *Dictionnaire illustré latin-français*, Paris, Hachette, 1934.
- Galison Peter Louis, « Minkowski's Space-Time: From Visual Thinking to the Absolute World », *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 10, University of California Press, 1979, p. 85-121.
- Gallagher Shaun et Katsunori Miyahara, « Neo-Pragmatism and Enactive Intentionality », in J. Schulkin (ed.), *Action, Perception and the Brain: Adaptation and Cephalic Expression*, London, Palgrave Macmillan UK, coll. « New Directions in Philosophy and Cognitive Science », 2012, p. 117-146.
- Ganier Franck, *Le traitement cognitif, déterminant de la conception de documents procéduraux : le cas des guides d'utilisation SEB*, Thèse de doctorat en psychologie, Dijon, 1999.
- Ganier Franck, Jean Gombert et Fayol Michel, « Effets du format de présentation des instructions sur l'apprentissage de procédures à l'aide de documents techniques », *Le travail humain*, vol. 63, n° 2, 2000, p. 121-152.
- Gayon Jean, « Mort ou persistance du darwinisme ? Regard d'un épistémologue », *Comptes Rendus Palevol*, vol. 8, n° 2, 2009, p. 321-340.
- Gens Hadrien, *Jakob von Uexküll, explorateur des milieux vivants : logique de la signification*, Paris, Hermann, coll. « Visions des sciences », 2014.
- Giardino Valeria, « Tools for Thought : The Case of Mathematics », *Endeavour*, vol. 42, n° 2, 2018, p. 172-179.
- Giardino Valeria, « L'imagination manipulatoire en mathématique », *Bulletin d'Analyse Phénoménologique*, vol. 13, n° 2, 2017 (DOI : 10.25518/1782-2041.969).

- Giardino Valeria, « Towards a diagrammatic classification », *The Knowledge Engineering Review*, vol. 28, n° 3, Cambridge University Press, 2013, p. 237-248.
- Gibson James Jerome, *Approche écologique de la perception visuelle*, O. Putois (trad.), Bellevaux, Éditions Dehors, 2014.
- Girard Jean-Yves, Kurt Gödel, Ernest Nagel et James R. Newman, *Le théorème de Gödel*, J.-B. Scherrer (trad.), Paris, Seuil, coll. « Points », n° 122, 1997.
- Goethe Johann Wolfgang von et Dorothea Kuhn, *Die Schriften zur Naturwissenschaft*, Abt. 1, Bd. 9: Morphologische Hefte 1817-1824, Leopoldina Ausgabe, Böhlau, Weimar, 1954.
- Goldstine Herman H., *The Computer, from Pascal to von Neumann*, Princeton, Princeton University Press, 1972.
- Goodman Nelson, *Langages de l'art: une approche de la théorie des symboles*, J. Morizot (trad.), Paris, Fayard, coll. « Pluriel », 2011.
- Goody Jack, *La raison graphique: la domestication de la pensée sauvage*, Paris, Éditions de Minuit, coll. « Le Sens commun », 1979.
- Grothendieck Alexandre, « Sur quelques points d'algèbre homologique, I », *Tohoku Mathematical Journal*, vol. 9, n° 2, Tohoku University, Mathematical Institute, 1957, p. 119-221.
- Gualandi Alberto, *L'œil, la main et la voix: une théorie communicative de l'expérience humaine*, Paris, Hermann, coll. « Visions des sciences », 2014.
- Guchet Xavier, « Technology, Sociology, Humanism: Simondon and the Problem of the Human Sciences », *SubStance*, vol. 41, n° 3, University of Wisconsin Press, 2012, p. 76-92.
- Guchet Xavier, *Pour un humanisme technologique: culture, technique et société dans la philosophie de Gilbert Simondon*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Pratiques théoriques », 2010.
- Haroche Serge, *Physique quantique*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », 2004.
- Hayes Brian, « Gauss's Day of Reckoning », *American Scientist*, vol. 94, n° 3, 2006. DOI: 10.1511/2006.59.200

- Heidegger Martin, *Essais et conférences* (1958), A. Préau (trad.), Paris, Gallimard, coll. « Tel », n° 52, 1992.
- Heidegger Martin, *Être et temps* (1927), E. Martineau (trad.), Paris, Authentica, 1985.
- Heidegger Martin, *Traité des catégories et de la signification chez Duns Scot* (1916), F. Gaboriau (trad.), Paris, Gallimard, coll. « Classiques de la philosophie », 1970.
- Hilbert David, *Sur les problèmes futurs des mathématiques : les 23 problèmes*, L. Laugel (trad.), Sceaux, Jacques Gabay, coll. « Les grands classiques Gauthier-Villars », 1990. URL : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k29049w/f4.item>
- Hilbert David, « Sur l'infini », A Weil (trad.), *Acta Mathematica*, vol. 48, n° 1-2, 1926, p. 91-122.
- Hofstadter Douglas Richard et Emmanuel Sander, *L'analogie : cœur de la pensée*, Paris, O. Jacob, 2013.
- Hoquet Thierry, *Darwin contre Darwin : comment lire « L'origine des espèces » ?*, Paris, Seuil, 2009.
- Hörl Erich, « La destinée cybernétique de l'occident. McCulloch, Heidegger et la fin de la philosophie », *Appareil*, n° 1, Maison des Sciences de l'Homme Paris Nord, 2008 (DOI : 10.4000/appareil.132).
- Humbert Pierre et Serge Colombo, *Le calcul symbolique et ses applications à la physique mathématique*, Paris, Gauthier-Villars, coll. « Mémorial des sciences mathématiques », n° 105, 1947.
- Hume David, *A Treatise of Human Nature : A Critical Edition*, D. F. Norton et M. J. Norton (eds.), Oxford, Clarendon Press, coll. « The Clarendon edition of the works of David Hume », 2007. 2 vol.
- Husserl Edmund, *Idées directrices pour une phénoménologie pure et une philosophie phénoménologique* (1913), J.-F. Lavigne (trad.), Paris, Gallimard, coll. « Bibliothèque de philosophie », 2018.
- Husserl Edmund, *La crise des sciences européennes et la phénoménologie transcendantale* (1954), G. Granel (trad.), Paris, Gallimard, coll. « Tel », n° 151, 1989.
- Husserl Edmund, *Articles sur la logique (1890-1913)*, J. English (trad.), Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », n° 49, 1975.

- Husserl Edmund, *L'origine de la géométrie* (1936), J. Derrida (trad.), Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », n° 26, 1962.
- Husserl Edmund, *Recherches logiques 1: prolégomènes à la logique pure* (1900), H. Elie (trad.), Presses universitaires de France, Paris, coll. « Épiméthée », 1959.
- Hutchins Edwin, « Material anchors for conceptual blends », *Journal of Pragmatics*, vol. 37, n° 10, 2005, p. 1555-1577.
- Ingold Tim, *Une brève histoire des lignes*, S. Renaut (trad.), Bruxelles, Zones Sensibles, 2013.
- James William, *Essais d'empirisme radical*, G. Garreta et M. Girel (trad.), Paris, Flammarion, 2007.
- Jedrzejewski Franck, *Ontologie des catégories*, Paris, L'Harmattan, coll. « Ouverture philosophique », 2011.
- Jedrzejewski Franck, *Diagrammes et Catégories*, Thèse de doctorat en philosophie, Université Paris-Diderot - Paris VII, 2007.
- Jousse Marcel, *L'anthropologie du geste*, Paris, Gallimard, coll. « Tel », n° 358, 2008.
- Kant Emmanuel, *Qu'est-ce que les Lumières ?*, M. Haumesser (éd.), J.-F. Poirier et F. Proust (trad.), Paris, Flammarion, coll. « GF », 2020.
- Kant Emmanuel, *Critique de la raison pure*, A. Renaut et P. Savidan (éd.), Paris, Flammarion, coll. « GF », n° 1142, 2001.
- Kant Emmanuel, *Les progrès de la métaphysique en Allemagne depuis le temps de Leibniz et de Wolf*, L. Guillermit (trad.), Paris, J. Vrin, coll. « Bibliothèque des textes philosophiques », 1990.
- Kant Emmanuel, *Critique de la faculté de juger (suivi de) Idée d'une histoire universelle au point de vue cosmopolitique (et de) Réponse à la question, qu'est-ce que les Lumières ?*, F. Alquié (dir.), Paris, Gallimard, coll. « Folio », n° 134, 1989.
- Kapp Ernst, *Principes d'une philosophie de la technique* (1877), G. Chamayou (trad.), Paris, J. Vrin, coll. « Pour demain », 2007.
- Kim Sung-Do, « La raison graphique de Saussure », *Cahiers Ferdinand de Saussure*, n° 61, Librairie Droz, 2008, p. 23-42.

- Klein Ursula (ed.), *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht, Springer, coll. « Boston Studies in the Philosophy and History of Science », vol. 222, 2001.
- Klein Ursula , « The Creative Power of Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry », in U. Klein (ed.), *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, Dordrecht, Springer, 2001, p. 13-34.
- Kobayashi S. I., H. Ezawa Y. Murayama et al. (eds.), *Proceedings of the 3rd international symposium. Foundations of quantum mechanics*, Tokyo, Physical Society of Japan, 1990.
- Kohn Eduardo, *Comment pensent les forêts : vers une anthropologie au-delà de l'humain*, G. Delaplace (trad.), Bruxelles, Zones Sensibles, 2017.
- Koppelman Elaine, « The Calculus of Operations and the Rise of Abstract Algebra », *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 8, n° 3, 1971, p. 155-242.
- Krämer Sybille, « Why notational iconicity is a form of operational iconicity », in A. Zirker, M. Bauer, O. Fischer et C. Ljungberg (eds.), *Dimensions of Iconicity*, Amsterdam, John Benjamins Publishing Company, 2017, vol. 15.
- Krämer Sybille, « Writing, Notational Iconicity, Calculus: On Writing as a Cultural Technique », *MLN*, vol. 118, n° 3, Johns Hopkins University Press, 2003, p. 518-537.
- Krömer Ralf, *Tool and Object: A History and Philosophy of Category Theory*, Basel ; Boston, Birkhäuser, coll. « Science Networks. Historical studies », vol. 32, 2007.
- Krömer Ralf, « La “machine de Grothendieck” se fonde-t-elle seulement sur des vocables métamathématiques ? Bourbaki et les catégories au cours des années cinquante », *Revue d'histoire des mathématiques*, vol. 12, n° 1, 2006, p. 119-162.
- Krtolica Igor, « Diagramme et agencement chez Gilles Deleuze : l'élaboration du concept de diagramme au contact de Foucault », *Filozofija i društvo / Philosophy and Society*, vol. 20, n° 3, 2009 (DOI : 10.2298/FID0903097K).
- Landry Bernard, « L'analogie de proportion chez saint Thomas d'Aquin », *Revue Philosophique de Louvain*, vol. 24, n° 95, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1922, p. 257-280.
- Landry Bernard, « L'analogie de proportionnalité chez saint Thomas d'Aquin », *Revue Philosophique de Louvain*, vol. 24, n° 96, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1922, p. 454-464.

- Largeault Jean (éd.), *Logique mathématique*, Paris, Armand Colin, 1972.
- Lassègue Jean, *Ernst Cassirer, du transcendantal au sémiotique*, Paris, J. Vrin, coll. « Mathesis », 2016.
- Lassègue Jean, *Pour une anthropologie sémiotique : recherches sur le concept de Forme symbolique*, Mémoire original – Habilitation à diriger des recherches, Université Paris-Sorbonne Paris IV, 2010.
- Lassègue Jean, *L'intelligence artificielle et la question du continu : remarques sur le modèle de Turing*, Thèse de doctorat en philosophie, Université de Nanterre - Paris X, 1994.
- Latour Bruno, « Un livre de Reviel Netz pour une approche non formaliste des formalismes », *Revue d'anthropologie des connaissances*, vol. 3, n° 2, 2009, p. 185-206.
- Leclercq Bruno, « Iconic virtues of diagrams. Peirce on ampliative reasoning », *Signata. Annales des sémiotiques / Annals of Semiotics*, n° 10, Université de Liège, 2019 (DOI : 10.4000/signata.2286).
- Leibniz Gottfried Wilhelm, *Mathesis universalis : écrits sur la mathématique universelle*, D. Rabouin (éd.), Paris, J. Vrin, coll. « Mathesis », 2018.
- Leibniz Gottfried Wilhelm, *Recherches générales sur l'analyse des notions et des vérités : 24 thèses métaphysiques et autres textes logiques et métaphysiques*, J.-B. Rauzy (éd.), Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », 1998.
- Lelarge Denis, *L'encyclopédie sociale d'Otto Neurath : la raison visuelle*, Paris, L'Harmattan, coll. « Mouvement des savoirs », 2009.
- Leroi-Gourhan André, *Le Geste et la Parole*, Paris, Albin Michel, 1964-1965. 2 vol.
- Loget François, « Avant la “langue des calculs”. L'écriture des opérations dans l'*Algebra* de Pierre de La Ramée », *Philosophia Scientiae*, vol. 22, n° 2, 2018, p. 81-113.
- Mallat Stéphane, *Sciences des données et apprentissage en grande dimension*, Paris, Fayard/Collège de France, 2018.
- Maniglier Patrice (dir.), *Le moment philosophique des années 1960 en France*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Philosophie française contemporaine », 2011.
- Manovitch Lev, « Cultural Analytics: Vizualizing Cultural Patters in the Era of More Media », *Domus*, Milan, 2009.

- Martinet André, *Éléments de linguistique générale*, Paris, Armand Colin, 1960.
- Maurseth Anne Beate, « La règle de trois : l'analogie dans *Le Rêve de D'Alembert* », *Recherches sur Diderot et sur l'Encyclopédie*, n° 34, Société Diderot, 2003 (DOI : 10.4000/rde.164).
- McCulloch Warren S. et Walter Pitts, « A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity », *The bulletin of mathematical biophysics*, vol. 5, n° 4, 1943, p. 115-133.
- Mèlès Baptiste, « Pratique mathématique et lectures de Hegel, de Jean Cavailles à William Lawvere », *Philosophia Scientiæ*, vol. 16, n° 1, 2012, p. 153-182.
- Mitchell W. J. T., « Diagrammatology », *Critical Inquiry*, vol. 7, n° 3, 1981, p. 622-633.
- Morizot Baptiste, *Pour une théorie de la rencontre : hasard et individuation chez G. Simondon*, Paris, J. Vrin, coll. « Pour demain », 2016.
- Moutet Laurent, *Diagrammes et théorie de la relativité restreinte : une ingénierie didactique*, Thèse de doctorat en didactique des sciences physiques, Université Sorbonne Paris Cité, 2016.
- Mumford Lewis, « La première mégamachine », *Diogène*, n° 55, 1966, p. 3-20.
- Netz Reviel, *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics : A Study of Cognitive History*, Cambridge, Cambridge University Press, coll. « Ideas in context », vol. 51, 1999.
- Neurath Marie et Robin Kinross, *Le transformateur : principes de création des diagrammes Isotype*, D. Suboticki (trad.), Paris, B42, 2013.
- Nicolas François (dir.), *Les mutations de l'écriture*, Paris, Éditions de la Sorbonne, coll. « Logique, langage, sciences, philosophie », 2013.
- Pégny Maël, « Les deux formes de la thèse de Church-Turing et l'épistémologie du calcul », *Philosophia Scientiæ*, vol. 16, n° 3, 2012, p. 39-67.
- Peirce Charles Sanders, « On the Algebra of Logic : A Contribution to the Philosophy of Notation », *American Journal of Mathematics*, vol. 7, n° 2, The Johns Hopkins University Press, 1885, p. 180-196.
- Peirce Charles Sanders, *Écrits sur le signe*, Paris, Seuil, coll. « L'ordre philosophique », n° 31, 1992.

- Peirce Charles Sanders, *Collected papers of Charles Sanders Peirce*, C. Hartshorne et P. Weiss (eds.), Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1931-1935.
- Pépin François, *La philosophie expérimentale de Diderot et la chimie : philosophie, sciences et arts*, Paris, Classiques Garnier, coll. « Histoire et philosophie des sciences », n° 4, 2012.
- Pépin François, « Diderot : la chimie comme modèle d'une philosophie expérimentale », *Dix-huitième siècle*, vol. 42, n° 1, Société Française d'Étude du Dix-Huitième Siècle, 2010, p. 445-472.
- Priest Greg, « Diagramming Evolution: The Case of Darwin's Trees », *Endeavour*, vol. 42, n° 2, 2018, p. 157-171.
- Priestley Mark, *A Science of Operations: Machines, Logic and the Invention of Programming*, London, Springer-Verlag, coll. « History of Computing », 2011.
- Prochiantz Alain, *Géométries du vivant*, Paris, Collège de France/Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 194, 2008.
- Py Bernard, *La statistique sans formule mathématique*, 2^e éd, Paris, Pearson Education, 2010.
- Rabouin David, « Mathesis universalis et algèbre générale dans les *Regulae ad directionem ingenii* de Descartes », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 69, n° 2, Armand Colin, 2016, p. 259-309.
- Ragan Mark A., « Trees and networks before and after Darwin », *Biology Direct*, vol. 4, n° 1, 2009.
- Renon Anne-Lyse, *Design & sciences*, Saint-Denis, Presses universitaires de Vincennes, coll. « Libre cours », 2020.
- Ricœur Paul, *Anthologie*, M. Foessel et F. Lamouche (éd.), Paris, Points, coll. « Points », n° 576, 2007.
- Roberts Don Davis, *The Existential Graphs of Charles S. Peirce*, The Hague ; Paris, Mouton, coll. « Approaches to semiotics », vol. 27, 1973.
- Rosen Robert, « A relational theory of biological systems », *The bulletin of mathematical biophysics*, vol. 20, n° 3, 1958, p. 245-260.
- Rosenblueth Arturo, Norbert Wiener et Julian Bigelow, « Behavior, Purpose and Teleology », *Philosophy of Science*, vol. 10, n° 1, 1943, p. 18-24.

- Ruffieux Christiane, *La naissance du concept de structure algébrique en Grande-Bretagne dans la première moitié du 19^e siècle : influence des philosophes de l'École écossaise du sens commun*, Thèse de doctorat ès sciences, Université de Genève, 2005.
- Ruyer Raymond, *La genèse des formes vivantes*, Paris, Flammarion, 1958.
- Salanskis Jean-Michel, *L'herméneutique formelle : l'infini, le continu, l'espace*, Paris, Klincksieck, coll. « Continents philosophiques », n° 8, 2013.
- Salanskis Jean-Michel, François Rastier et Ruth Scheps (dir.), *Herméneutique : textes, sciences*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Philosophie d'aujourd'hui », 1997.
- Sauvagnargues Anne, « Machines, comment ça marche ? », *Chimères*, vol. 77, n° 2, Ramonville Saint-Agne, Érès, 2012, p. 35-46.
- Sauvagnargues Anne, *Deleuze et l'art*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Lignes d'art », 2005.
- Popper Karl, *Unended Quest : An Intellectual Autobiography*, Open Court Publishing, LaSalle, Illinois, 1974.
- Serfati Michel, *La révolution symbolique : la constitution de l'écriture symbolique mathématique*, Paris, Pétra, coll. « Transphilosophiques », 2005.
- Shimajima Atsushi, « The Graphic-Linguistic Distinction Exploring Alternatives », *Artificial Intelligence Review*, vol. 15, n° 1, 2001, p. 5-27.
- Sigaut François, « Techniques, technologies, apprentissage et plaisir au travail », *Techniques & Culture. Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, n° 52-53, Les éditions de l'EHESS, 2009, p. 40-49.
- Simondon Gilbert, *Sur la philosophie : 1950-1980*, N. Simondon et I. Saurin (éd.), Paris, Presses universitaires de France, 2016.
- Simondon Gilbert, *Imagination et invention : 1965-1966*, N. Simondon et J.-Y. Chateau (éd.), Paris, Presses universitaires de France, 2014.
- Simondon Gilbert, *Du mode d'existence des objets techniques*, Paris, Aubier, coll. « Aubier philosophie », 2012.
- Simondon Gilbert, *Communication et information : cours et conférences*, J.-Y. Chateau et N. Simondon (éd.), Chatou, La Transparence, 2010.

- Simondon Gilbert, « Mentalité technique », *Revue philosophique de la France et de l'étranger*, Tome 131, n° 3, Presses universitaires de France, 2006, p. 343-357.
- Simondon Gilbert, *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information* (1958), Grenoble, J. Millon, 2013.
- Sissel Hoel Aud, « Operative Image », in L. Feiersinger, K. Friedrich & M. Queisner (eds.), *Image – Action – Space: Situating the Screen in Visual Practice*, Berlin-Boston, Walter de Gruyter, 2018, p. 11-27.
- Sokal Alan D. et Jean Bricmont, *Impostures intellectuelles*, Paris, Odile Jacob, 1997.
- Solages Bruno de, *Dialogue sur l'analogie : à la Société toulousaine de philosophie*, Paris, Aubier, 1946.
- Sowa John F., *Conceptual Structures: Information Processing in Mind and Machine*, Reading, Mass., Addison-Wesley, coll. « The Systems Programming Series », 1984.
- Spinoza Baruch, *Éthique*, B. Pautrat (éd.), Paris, Seuil, coll. « Points », 2010.
- Stiegler Bernard, *La technique et le temps (suivi de) Le nouveau conflit des facultés et des fonctions dans l'anthropocène*, Paris, Fayard, 2018.
- Stiegler Bernard (dir.), *Digital studies : organologie des savoirs et technologies de la connaissance*, Limoges, Fyp éditions, coll. « Collection du nouveau monde industriel », 2014.
- Stiegler Bernard, « Le carnaval de la nouvelle toile », in B. Juanals et J.-M. Noyer (dir.), *Technologies de l'information et intelligences collectives*, Paris, Hermes Science Publications, 2010, ch. 2.
- Stiegler Bernard, *Prendre soin*, Paris, Flammarion, 2008.
- Stiegler Bernard, *La technique et le temps 3 : le temps du cinéma et la question du mal-être*, Paris, Galilée, coll. « La philosophie en effet », 2001.
- Stiegler Bernard, « Leroi-Gourhan : l'inorganique organisé », *Les cahiers de médiologie*, vol. 6, n° 2, 1998, p. 187-194.
- Stiegler Bernard, *La technique et le temps 2 : la désorientation*, Paris, Galilée, coll. « La philosophie en effet », 1996.

- Stiegler Bernard, *La technique et le temps 1: la faute d'Épiméthée*, Paris, Galilée, coll. « La philosophie en effet », 1994.
- Stiegler Bernard, « Machines à écrire et matières à penser », *Genesis (Manuscrits-Recherche-Invention)*, vol. 5, n° 1, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1994, p. 25-49.
- Stjernfelt Frederik , « On Operational and Optimal Iconicity in Peirce's Diagrammatology », *Semiotica*, vol. 2011, n° 186, 2011.
- Stjernfelt Frederik, *Diagrammatology: An Investigation on the Borderlines of Phenomenology, Ontology, and Semiotics*, Springer Netherlands, coll. « Synthese Library », 2007.
- Straw R. D. et al. (eds.), *The ARRL Antenna Book*, 20th ed., Newington, Connecticut, ARRL, 2005.
- Svensson Lennart, « Theoretical Foundations of Phenomenography », *Higher Education Research & Development*, vol. 16, n° 2, Routledge, 1997, p. 159-171.
- Sylvester J. J. et F. Franklin, « A Constructive Theory of Partitions, Arranged in Three Acts, an Interact and an Exodion », *American Journal of Mathematics*, vol. 5, n° 1, Johns Hopkins University Press, 1882, p. 251-330.
- Tamine Lynda, Mohand Boughanem & Claude Chrisment, « Accès personnalisé à l'information : vers un modèle basé sur les diagrammes d'influence », *Revue I3 - Information Interaction Intelligence*, Toulouse, Cépaduès, 2006, p. 69-90.
- Timmermans Benoît, *Histoire philosophique de l'algèbre moderne: les origines romantiques de la pensée abstraite*, Paris, Classiques Garnier, coll. « Histoire et philosophie des sciences », n° 3, 2012.
- Turing A. M., « Computing machinery and intelligence », *Mind*, LIX, n° 236, 1950, p. 433-460.
- Turing A. M., « Systems of Logic Based on Ordinals† », *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s2-45, n° 1, 1939, p. 161-228.
- Turing A. M., « On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem », *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s2-42, n° 1, 1937, p. 230-265.

- Turing A. M., *La machine de Turing*, Jean-Yves Girard (dir.), J. Basch et P. Blanchard (trad.), Paris, Seuil, coll. « Points », n° 131, 1999.
- Uexküll Jakob von, *Milieu animal et milieu humain*, C. Martin-Fréville (trad.), Paris, Denoël, 1965.
- Varenne Franck, « Théorie mathématique des catégories en biologie et notion d'équivalence naturelle chez Robert Rosen », *Revue d'histoire des sciences*, vol. 66, n° 1, Armand Colin, 2013, p. 167-197.
- Vatin François, « Mauss et la technologie », *Revue du MAUSS*, vol. 23, n° 1, La Découverte, 2004, p. 418-433.
- Vernant Jean-Pierre, « Aspects psychologiques du travail dans la Grèce ancienne », in *Mythe et pensée chez les Grecs* (1965), Paris, La Découverte, 1996, p. 295-301.
- Vernant Jean-Pierre, « Travail et nature dans la Grèce ancienne », in *Mythe et pensée chez les Grecs* (1965), Paris, La Découverte, 1996, p. 274-294.
- Vicaut Éric, « Équilibre acido-basique », Biophysique P1.
https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Equilibre_acido-basique_Cours_P1_Pr_Vicaut_2011.pdf
- Vioulac Jean, *L'époque de la technique : Marx, Heidegger et l'accomplissement de la métaphysique*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Épiméthée », 2009.
- Vogel Jérôme, *Sémiotique de l'information chez Charles S. Peirce*, Thèse de doctorat en sémiologie, Montréal, Université du Québec à Montréal, 2014.
- Vorms Marion, *Théories, modes d'emploi : une perspective cognitive sur l'activité théorique dans les sciences empiriques*, Thèse de doctorat en philosophie, Université Panthéon-Sorbonne - Paris 1, 2009.
- Voss Julia, *Darwin's Pictures: Views of Evolutionary Theory, 1837-1874*, New Haven, Yale University Press, 2010.
- Wallet Guy et Stefan Neuwirth, « Enquête sur les modes d'existence des êtres mathématiques », *Philosophia Scientiæ*, vol. 23, n° 3, 2019, p. 83-108.
- Walter Scott, *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité restreinte, 1905-1915*, Thèse de doctorat en épistémologie et histoire des sciences, Paris 7, 1996.

Wheeler Everett L., *Stratagem and the Vocabulary of Military Trickery*, Leiden ; New York, Brill, 1988.

Wheeler John Archibald, « Information, Physics, Quantum : the Search for Links », in S. I. Kobayashi, H. Ezawa, Y. Murayama et al. (eds.), *Proceedings of the 3rd International Symposium. Foundations of Quantum Mechanics*, The Physical Society of Japan, Tokyo, 1990.

Wiener Norbert, *La cybernétique : information et régulation dans le vivant et la machine*, R. Vallée et N. Vallée (trad.), Paris, Seuil, coll. « Sources du savoir », 2014.

Zemirli Nesrine, *Modèle d'accès personnalisé à l'information basé sur les diagrammes d'influence intégrant un profil utilisateur évolutif*, Thèse de doctorat en informatique, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2008.

Sources vidéographiques

Boutang Pierre-André, Michel Pamart, Claire Parnet et Gilles Deleuze, *L'abécédaire de Gilles Deleuze*, Paris, Éditions Montparnasse & Welcome distrib., 1998.

Colin Julien, Jean-Pierre Dupuy et Dorothée Browaeys, *Le silence des nanos*, À bout de champ, 2008.

Klein Étienne, « Que savons-nous du temps ? », *Journées X-ENS-UPS de physique*, 11 mai 2006. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=NDYIdBMLQR0>

BIBLIOGRAPHIE DES ŒUVRES CONSULTÉES

- Bapteste Éric, Anouk Barberousse, Frédéric Bouchard, Vincent Devictor, John Dupré, Sébastien Dutreuil, Evelyn Fox Keller, Jean Gayon, Philippe Huneman, Marie I. Kaiser, Gladys Kostyrka, Lucie Laplane, Laurent Loison, Virginie Maris, Johannes Martens, Michel Morange, Matteo Mossio, Antonine Nicoglou, Cédric Paternotte, Karine PrévotEAU, Christian Sachse, Jon Umerez et Marion Clara Vorms, *Précis de philosophie de la biologie*, T.Hoquet et F. Merlin (dir.), Paris, Vuibert, 2014.
- Batt Noëlle (dir.), *Penser par le diagramme, TLE. Théorie littérature enseignement*, Saint-Denis, Presses universitaires de Vincennes, 2004.
- Bertin Jacques, *Sémiologie graphique : les diagrammes, les réseaux, les cartes* (1967), Paris, EHESS, 2005.
- Boi Luciano, *Morphologie de l'invisible : transformations d'objets, formes de l'espace, singularités phénoménales et pensée diagrammatique*, Limoges, Presses universitaires de Limoges, 2011.
- Cassou-Noguès Pierre, « Le continu et les intuitions mathématiques. Problèmes liés à l'intuition mathématique dans la pensée de Gödel », *Intellectica*, vol. 51, n° 1, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 2009, p. 33-57.
- Cassou-Noguès Pierre, *Les démons de Gödel. Logique et folie*, Paris, Seuil, coll. « Sciences », 2007.
- Chevalier Jean-Marie, « Peirce lecteur de Kant », *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, vol. 20, n° 1, 2016, p. 143-163.
- Dahan-Gaida Laurence, « Pensée analogique et dynamiques de la forme chez Paul Valéry : modèles, forces, diagrammes », *Tangence*, n° 95, 2011, p. 43-65.
- De Landa Manuel, « Deleuze, Diagrams, and the Genesis of Form », *Amerikastudien / American Studies*, vol. 45, n° 1, 2000, p. 33-41.
- Debuiche Valérie, « L'expression leibnizienne et ses modèles mathématiques », *Journal of the History of Philosophy*, vol. 51, n° 3, 2013, pp. 409-439.
- Derrida Jacques, *De la grammatologie*, Paris, Éditions de Minuit, 1967.

- Dondero Maria Giulia, « Du texte à la pratique : pour une sémiotique expérimentale », *Semiotica*, vol. 2017, n° 219, Mouton de Gruyter, 2017 (DOI : 10.1515/sem-2017-0081).
- Dondero Maria Giulia, « L'approche sémiotique de Charles Goodwin : langage visuel, énonciation et diagramme », *Tracés : Revue des Sciences Humaines*, Hors-série 2016, ENS Éditions, 2016 (DOI : 10.4000/traces.6548).
- Dondero Maria Giulia, « Sémiotique de l'action : textualisation et notation », *CASA: Cadernos de Semiótica Aplicada*, vol. 12, n° 1, Faculdade de Ciências e Letras da UNESP, 2014 (en ligne : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/169929>).
- Dondero Maria Giulia, « La totalité diagrammatique en mathématiques et en art », *Visible*, vol. 9, Presses Universitaires de Limoges, 2012 (en ligne : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/106150>).
- Dondero Maria Giulia, « Le diagramme entre perception visuelle et mathématique », *Visible*, vol. 8, Presses universitaires de Limoges, 2012 (en ligne : <https://orbi.uliege.be/handle/2268/94101>).
- Dondero Maria Giulia, « L'image scientifique : de la visualisation à la mathématisation et retour », *Actes Sémiotiques*, vol. 112, Université de Limoges, 2009 (en ligne : <https://www.unilim.fr/actes-semiotiques/index.php?id=1653>).
- Drucker Johanna et Morgane Mignon, *Visualisation : l'interprétation modélisante*, M.-M. Bortolotti (trad.), Paris, Éditions B42, 2020.
- Dupuis Joachim Daniel, *Gilles Deleuze, Félix Guattari et Gilles Châtelet : de l'expérience diagrammatique*, Paris, L'Harmattan, 2012.
- Edeline Francis, « Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques : ou de l'icône au symbole et retour », *Protée*, vol. 37, n° 3, Département des arts et lettres - Université du Québec à Chicoutimi, 2009, p. 45-56.
- Eilenberg Samuel et Saunders Mac Lane, « General Theory of Natural Equivalences », *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 58, n° 2, American Mathematical Society, 1945, p. 231-294
- Ganier Franck, *Comprendre la documentation technique*, Paris, Presses universitaires de France, 2013.
- Garapon Antoine et Jean Lassègue, *Justice digitale : révolution graphique et rupture anthropologique*, Paris, Presses universitaires de France, 2018.

- Gardey Delphine, *Écrire, calculer, classer : comment une révolution de papier a transformé les sociétés contemporaines, 1800-1940*, Paris, La Découverte, 2008.
- Giardino Valeria, « Manipulative Imagination : How to Move Things Around in Mathematics », *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*, vol. 33, n° 2, Euskal Herriko Unibertsitatea / Universidad Del País Vasco, 2018, p. 345-360.
- Giardino Valeria, « Intuition and Visualization in Mathematical Problem Solving », *Topoi*, vol. 29, n° 1, Springer, 2010, p. 29-39.
- Granger Gilles Gaston, *Formes, opérations, objets*, Paris, J. Vrin, coll. « Mathesis », 1994.
- Hallyn Fernand, *Les structures rhétoriques de la science : de Kepler à Maxwell*, Paris, Seuil, coll. « Des travaux », 2004.
- Herrenschmidt Clarisse, *Les trois écritures : langue, nombre, code*, Paris, Gallimard, 2007.
- Ingold Tim, *Faire : anthropologie, archéologie, art et architecture*, H. Gosselin et H.-S. Afeissa (trad.), Bellevaux, Éditions Dehors, 2017.
- Ingold Tim, *Une brève histoire des lignes*, S. Renaut (trad.), Bruxelles, Zones Sensibles, 2013.
- Kemp Martin, *Structural Intuitions: Seeing Shapes in Art and Science*, Charlottesville, University of Virginia Press, coll. « Page-Barbour Lectures », 2016.
- Krämer Sybille, « The 'eye of the mind' and the 'eye of the body': Descartes and Leibniz on truth, mathematics, and visibility », *in* F. G. Barth, P. Giampieri-Deutsch et H.-D. Klein (eds.), *Sensory Perception*, Vienna, Springer Vienna, 2012, p. 369-382.
- Krämer Sybille et Christina Ljungberg (eds.), *Thinking with Diagrams : the Semiotic Basis of Human Cognition*, Berlin, Boston, De Gruyter, 2016.
- Lassègue Jean, « L'évolution du constructivisme turingien : de la logique à la morphogenèse », *Intellectica*, vol. 39, n° 2, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 2004, p. 107-124.
- Lassègue Jean, « Turing, entre formel et forme ; remarque sur la convergence des perspectives morphologiques », *Intellectica*, vol. 35, n° 2, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 2002, p. 185-198.

- Lassègue Jean, « L'actualité de Turing : l'inférence dans la pensée, le calcul et les formes biologiques », *Séminaire de Philosophie et Mathématiques*, n° 2, 1996, p. 1-23.
- Lassègue Jean, « La méthode expérimentale, la modélisation informatique et l'intelligence artificielle », *Intellectica*, vol. 22, n° 1, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1996, p. 21-65.
- Lassègue Jean, « Note sur l'emploi et l'origine de la notion de représentation en sciences cognitives », *Intellectica*, vol. 17, n° 2, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 1993, p. 199-212.
- Lassègue Jean et Yves-Marie Visetti, « Que reste-t-il de la représentation ? Pour introduire au dossier », *Intellectica*, vol. 35, n° 2, Persée - Portail des revues scientifiques en SHS, 2002, p. 7-25.
- Leclercq Bruno, « Rhétorique de l'idéographie », *Actes Sémiotiques*, vol. 114, Université de Limoges, 2011 (en ligne : <https://www.unilim.fr/actes-semiotiques/index.php?id=2789>).
- Marquis Jean-Pierre, *From a Geometrical Point of View : A Study of the History and Philosophy of Category Theory*, Springer Netherlands, coll. « Logic, Epistemology, and the Unity of Science », 2009.
- Masure Anthony, *Design et humanités numériques*, Paris, B42, 2017.
- Meerhoff Jasmin, *Read me! eine Kultur - und Mediengeschichte der Bedienungsanleitung*, Bielefeld, Transcript, coll. « Masse und Medium », n° 9, 2011.
- Meier Alexis, « Diagrammes, architecture, musique », *Rue Descartes*, vol. 56, n° 2, Collège international de Philosophie, 2007, p. 46-57.
- Moretti Franco et Laurent Jeanpierre, *Graphes, cartes et arbres : modèles abstraits pour une autre histoire de la littérature*, É. Dobenesque (trad.), Paris, Les Prairies ordinaires, 2008.
- Neurath Otto, *Gesellschaft und Wirtschaft. Bildstatistisches Elementarwerk*, Leipzig, Bibliographisches Institut, 1930.
- Ong Walter Jackson, *Oralité et écriture : la technologie de la parole*, H. Hiessler (trad.), Paris, Les Belles Lettres, 2014.
- Petitot Jean, *Morphogenèse du sens*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Formes sémiotiques », 1985.

- Philizot Vivien et Jérôme Saint-Loubert Bié (dir.), *Technique & design graphique : outils, médias, savoirs*, Paris, B42, 2020.
- Rabouin David, « Logic of imagination. Echoes of Cartesian epistemology in contemporary philosophy of mathematics and beyond », *Synthese*, vol. 195, n° 11, 2018, p. 4751-4783.
- Rabouin David, « Les mathématiques comme logique de l'imagination : une proposition leibnizienne et son actualité », *Bulletin d'Analyse Phénoménologique*, 2017 (DOI : 10.25518/1782-2041.955).
- Rosenbaum Alexis, « Sur le statut des diagrammes de Feynman en théorie quantique des champs », *Philosophia Scientiæ. Travaux d'histoire et de philosophie des sciences*, vol. 13, n° 2, 2009, p. 151-166.
- Roy Philippe, *L'immeuble du mobile : une philosophie de la nature avec Châtelet et Deleuze*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « MétaphysiqueS », 2020.
- Schier Flint, *La naturalité des images : essai sur la représentation iconique*, S. Réhault (trad.), Paris, Questions théoriques, 2019.
- Schmitt Jean-Claude, *Penser par figure : du compas divin aux diagrammes magiques*, Paris, Arkhê, coll. « Oblique/s », 2019.
- Stöltzner Michael, « Feynman Diagrams : Modeling between Physics and Mathematics », *Perspectives on Science*, vol. 26, n° 4, The MIT Press, 2018, p. 482-500.
- Thom René, *Apologie du logos*, Paris, Hachette, coll. « Histoire et philosophie des sciences », 1990.
- Vellodi Kamini, « Diagrammatic Thought : Two Forms of Constructivism in C. S. Peirce and Gilles Deleuze », *Parrhesia*, n° 19, 2014, p. 79-95.
- Wright Aaron Sidney, « Penrose Diagrams as Objects of Intuition », *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 44, n° 2, University of California Press, 2014, p. 99-139.
- Wüthrich Adrian, *The Genesis of Feynman Diagrams*, Springer Netherlands, coll. « Archimedes », 2011.
- Zwer Nephtys, *L'ingénierie sociale d'Otto Neurath*, Presses universitaires de Rouen et du Havre, 2018.

INDEX DES NOMS

- Agassiz, 288, 290
 Aït-Touati, 132
 Allwein, 327
 Alunni, 319, 410
 Arbogast, 121
 Aristote, 54, 57, 59, 335, 336, 344,n 372,
 416, 420, 527
 Arntz, 185
 Artaud, 433
 Auroux, 307, 310
 Baader, 120
 Babbage, 146
 Bachelard, xxvi, 122, 350, 356, 373, 376
 Bachimont, 37, 43, 47, 58, 78, 79, 81, 82,
 85, 94, 147, 148, 149, 244, 308, 310,
 313, 314, 317, 318, 323, 327, 328, 334,
 335, 340, 341, 344, 384, 388, 390, 404,
 411, 419, 441, 442, 443, 444, 542
 Bacon (peintre), 360, 361
 Bacon (philosophe), 116, 427
 Bakhtine, 372, 431
 Balibar, 430
 Barthélémy, xxvi, 332, 374, 376, 377, 393
 Barwise, 327
 Beaubois, 393, 396, 402, 403, 411, 540
 Beckmann, 119
 Bellucci, 319
 Benesch, 237
 Bergson, xxvi, 370, 372, 397
 Bernoulli, 120
 Berry, 440
 Berthoz, 399, 409, 427
 Bertin, 397
 Bigelow, 312
 Boi, 303
 Boirel, 340
 Bontems, 332, 376, 393, 396
 Boole, 55, 57, 60, 61, 62, 67, 271, 335,
 336
 Bottéro, 322
 Boulnois, 416
 Boutang, 396
 Boutroux, 130
 Bouveresse, 347, 348
 Brahami, xxiii, xxiv, 360
 Bredekamp, 286, 287, 288, 290, 291, 292,
 293, 295, 297, 327
 Brentano, 416
 Bricmont, 347
 Burali-Forti, 141
 Byrne, 153
 Canguilhem, xxvi, 95
 Cantor, 138, 139, 140, 141, 144
 Carnino, 119
 Carter, 234
 Cassirer, 329, 341
 Cassou-Noguès, 123, 124, 139, 140, 404,
 425, 440
 Cavailès, 123, 124, 297, 352, 404, 437t
 César, 418
 Chapman, 294
 Châtelet, 402, 404, 425, 443
 Chauviré, 125, 400, 402, 403
 Chazelle, 311, 313
 Chevalier, 381, 403, 406
 Church, 122, 439
 Colin, 436
 Colombo, 121
 Connes, 122, 351, 431, 545
 Conté, 237
 Coumet, 61
 Coxeter, 197
 Crick, 312
 D'Alembert, 115, 119, 361

- Darwin, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291,
 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 322,
 443
 Davenport, 259, 261, 262, 263
 De Finetti, 208
 De Morgan, 62, 119, 271
 De Toffoli, 327
 Debuiche, 160
 Deldicque, 393
 Deleuze, xxiii, 325, 326, 361, 365, 366,
 371, 372, 373, 375, 377, 391, 396, 397,
 416, 425, 428
 Dennett, 296
 Derrida, 307, 317
 Descartes, 130, 131, 132, 335, 337, 350,
 372, 375, 418, 420
 Desclès, 121
 Diagne, 61, 62
 Diderot, 115, 119, 361
 Dieckmann, 361
 Dixmier, 351
 Dondero, 401, 409, 417
 Dufourcq, 114
 Dugowson, 431
 Dupuy, 311, 313
 Durand-Gasselín, 256
 Durand-Richard, 57, 121, 335
 Dynkin, 197, 198
 Einstein, 143, 144, 264, 376, 410, 429,
 544
 Ellingham, 223, 224, 225, 226, 227, 228,
 229
 Eschyle, 414
 Eschenmayer, 120
 Espinas, 119
 Etchemendy, 327
 Euclide, 132, 153
 Euler, 57, 60, 64, 65, 67
 Ezawa, 311
 Fabbri, 79
 Fabre, 361
 Farocki, 327
 Feiersinger, 327
 Fermat, 143
 Ferri, xxiii, xxiv, 110, 124, 185, 294, 303,
 322, 332, 345, 384
 Foucault, 318, 365, 397, 405
 Franklin, 196
 Frege, 65, 137
 Friedrich, 327
 Gaffiot, 116
 Galilée, 82, 84, 306,n 418, 420, 428, 429
 Galois, 120, 399
 Ganier, 244
 Gaukroger, 132
 Gauss, 134
 Gayon, 295
 Gens, 403, 432, 433, 434
 Giardino, 77, 138, 317, 326, 327, 521, 539
 Gibson, 85
 Gödel, 137, 138, 139, 144, 145, 146, 425,
 440
 Goethe, 43, 120, 333, 334, 380, 381, 388,
 401, 404, 437
 Goldstine, 146
 Goodman (N.), 294, 321
 Goody, 43, 309, 317, 344, 419
 Gould, xxviii
 Grothendieck, 106, 131, 296, 351, 370,
 431
 Gualandi, 349, 390
 Guattari, 326y, 366, 391, 397, 531
 Guchet, 122
 Gueudet, 323
 Hacking, 349
 Hardy, 210, 211, 212, 250
 Haroche, 305
 Harris, 100
 Hasselbalch, 260, 261
 Havelange, 85
 Hegel, 124, 352
 Heidegger, xxvii, 317, 339, 389, 416, 433

- Heisenberg, 351, 521, 544
 Henderson, 260, 261
 Hilaire-Pérez, 119
 Hilbert, 125, 137, 138, 142, 143, 144, 145, 146, 154, 160
 Hippase de Métaponte, 414
 Hobbes, 428
 Hoquet, 286, 297
 Hofstadter, 416
 Hölderlin, 120
 Hooek, 119
 Hörl, 339
 Humbert, 121
 Humboldt, 397
 Husserl, 114, 123, 307, 308, 317, 328, 335, 339, 340, 398, 423
 Hutchins, 42, 78, 405, 525
 James (W.), xxiv
 Jedrzejewski, 106, 107, 117, 198, 375
 Jousse, 150
 Juanals, 306
 Kant, xxix, 335, 338, 339, 340, 342, 356, 372, 387, 388, 389, 397, 402, 404, 416, 427, 428, 429, 437, 438, 527
 Kapp, 119
 Khelif, 431
 Kinross, 396
 Klein (É.), 264
 Klein (U.), 316
 Kobayashi, 311
 Kohn, 403
 Koppelman, 121
 Krämer, 118
 Krömer, 159, 296
 Krtolica, 397
 Laban, 162, 201, 237, 238, 239, 240, 241, 250
 Lakoff, 349
 Lamarck, 287
 Landry, 365, 366
 Largeault, 143
 Lassègue, 125, 307, 341
 Latour, 349
 Lawvere, 124, 352
 Lazardzig, 318
 Leclercq, 404, 437
 Lehn, 436
 Leibniz, 116, 120, 131, 132, 146, 160, 335, 337, 338, 404
 Lenay, 85
 Léonard de Vinci, 88, 89
 Leroi-Gourhan, 113, 150, 310, 317, 532
 Lobo, 303
 Locke, 57, 121, 428
 Lolli, 327
 Lorentz, 232, 233
 Lorenz, 427
 Lyell, 286
 Mallat, 419
 Manovich, 419
 Markov, 391
 Martin, 61
 Martinet, 307
 Maturana, 435
 Maurseth, 361
 McCulloch, 312, 339
 Mèlès, 124, 352, 541
 Merleau-Ponty, 114
 Mgr Bruno de Solages, 392
 Minkowski, 162, 175, 201, 230, 232, 234, 235, 443
 Mitchell, 328
 Moktefi, 319, 498
 Morizot, xxviii, 390
 Mumford, 150
 Murayama, 311
 Netz, 331, 349, 391, 400
 Neurath, 184, 185, 186, 396
 Neuwirth, 332
 Newton, 357, 418, 428, 429, 430
 Nicolas (F.), 319, 410
 Nicolas (J.-P.), 234

- Norton, 428
 Nottale, 332, 376, 393
 Novalis, 120
 Nový, 55
 Noyer, 306
 Núñez, 349
 Panza, 327
 Pareto, 157, 178, 179, 180, 181
 Parnet, 396
 Pascal, 146, 367
 Peacock, 56, 57, 121
 Peano, 143
 Pégny, 439
 Peirce, xxvii, 43, 56, 74, 75, 76, 78, 83,
 125, 319, 328, 334, 342, 381, 384, 385,
 398, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406,
 410, 411, 412, 413, 414, 415, 417, 418,
 420, 437, 531
 Penrose, 118, 162, 172, 201, 234, 235,
 236, 443
 Pépin, 119
 Petit, 393
 Petitot, 79
 Pietarinen, 319
 Pitts, 312
 Platon, 307, 349, 372, 378, 416, 524
 Polyá, 370
 Popper, 311
 Priest, 295
 Priestley (J.), 176
 Priestley (M.), 122
 Prochiantz, 434
 Proust, 361
 Py, 177
 Pythagore, 128, 129, 152, 153
 Queisner, 327
 Rabouin, 131, 160
 Ragan, 296
 Randolph, 34, 162, 251, 270, 271, 272,
 273, 274, 275, 300, 447
 Rastier, 78
 Rauzy, 131
 Reid, 57
 Reidemeister (K.), 492, 493
 Reidemeister (M.), 184
 Renon, 342
 Reuleaux, 150
 Richard, 141
 Ricœur, 123
 Roberts, 342
 Rosen, 99, 108, 370
 Rosenblueth, 312
 Rothe, 120
 Roy, 102
 Ruffieux, 56, 120
 Ruffini, 120
 Russell (B.), 141
 Russell (H.), 181
 Ruyer, 391
 Salanskis, 78, 342
 Sander, 416
 Saurin, xxiv, 149, 321, 352, 354, 358, 368,
 369, 375, 376, 392, 395, 405
 Sauvagnargues, 150, 391
 Schlick, 144
 Schramm, 318
 Schubbach, 438
 Schwarte, 318
 Scot, 416
 Seebeck, 215
 Serfati, 120, 350
 Shannon, 153, 332, 368
 Sheps, 78
 Sigaut, 374
 Simondon (G.), xxiv, xxv, xxvi, xxvii,
 xxviii, xxx, 43, 116, 117, 122, 124, 149,
 317, 321, 331, 332, 333, 348, 349, 350,
 352, 354, 357, 358, 367, 368, 369, 370,
 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380,
 381, 383, 384, 385, 388, 390, 391, 392,
 393, 394, 395, 396, 399, 400, 401, 402,
 403, 404, 405, 406, 407, 409, 410, 414,

- 415, 416, 417, 418, 420, 430, 431, 433,
434, 435, 437, 522, 523, 528, 535, 540,
544, 546, 552.
- Simondon (N.), xxiv, xxviii, 149, 321,
331, 352, 354, 358, 368, 369, 375, 376,
378, 392, 395, 401, 402, 404, 405, 406,
409
- Sissel Hoel, 327
- Sockal, 347
- Solovine, 144, 429, 430
- Sowa, 81, 342, 531
- Spinoza, 116
- Stewart, 57
- Stiegler, xxx, 84, 113, 306, 310, 317, 323,
419
- Stjernfelt, 328, 405
- Strickland, 288, 289, 290
- Svensson, 319
- Sylvester, 121, 122, 196
- Thom, 370
- Thomas d'Aquin, 365, 366
- Timmermans, 120, 122, 352, 399
- Toncelli, 430
- Trouche, 323
- Turing, 41, 52, 79, 80, 123, 125, 137, 138,
146, 148, 154, 305, 310, 312, 313, 325,
339, 368, 410, 418, 420, 425, 439, 440,
441
- Uexküll, 384, 400, 403, 427, 430, 432,
433, 434
- Varela, 430, 435
- Varenne, 99, 370
- Vatin, 119
- Venn, 60, 62, 64, 65, 66, 67, 270
- Venturi, 327
- Vernant, 116
- Viète, 130, 375
- Vioulac, 414
- Viviani, 209, 210
- Vogel, 328, 381, 405, 406
- Von Neumann, 122, 146
- Vorms, 294, 321
- Voss, 295
- Wallace, 291, 297
- Wallet, 332
- Watson, 312
- Weierstrass, 144
- Weil, 144
- Weinberg, 210, 211, 212, 250
- Wheeler (E. L.), 418
- Wheeler (J. A.), 311
- Wiener, 122, 312, 380
- Wiles, 143
- Wilkins, 312
- Young, 195, 196

INDEX DES DIAGRAMMES

- Abaque de Smith, 253, 254, 255, 256, 257, 258
Chronogramme numérique, 467
Cinétographie Laban, 237, 238, 239, 240, 241, 242
Diagramme commutatif, 33, 106, 107, 162
Diagramme d'affinités, 163
Diagramme d'Ellingham, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229
Diagramme d'Euler, 60, 162, 172
Diagramme d'Evans, 474, 475
Diagramme d'influence, 33, 103, 104, 105, 106, 171, 172
Diagramme d'Ishikawa, 163, 167, 490, 491, 530
Diagramme de bifurcation, 467, 468
Diagramme de Bode, 468, 469
Diagramme de boucle causale, 495, 496
Diagramme de Carroll, 162, 452, 494, 496, 497, 498, 499
Diagramme de chromaticité, 163, 175, 470, 471, 472, 473
Diagramme de Clapeyron, 278, 279, 280, 282
Diagramme de constellation, 473, 474, 476, 481
Diagramme de Coxeter, 157, 196, 197, 455, 492
Diagramme de cycle, 488, 489, 490
Diagramme de Darwin, 34, 162, 166, 171, 173, 175, 251, 285, 286, 288, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 443
Diagramme de Davenport, 34, 251, 259, 261, 262, 263, 300
Diagramme de De Finetti, 208, 209, 211, 212, 250
Diagramme de Dynkin, 157, 162, 196, 198, 199, 455, 492
Diagramme de Ferrers, 34, 157, 162, 192, 193, 194, 195, 196, 200
Diagramme de Feynman, 34, 118, 162, 165, 170, 171, 173, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 447, 503, 536
Diagramme de flux, 33, 69, 96, 458
Diagramme de forces, 162, 165
Diagramme de Fresnel, 474, 475
Diagramme de Frost, 475, 476
Diagramme de Gantt, 50, 163, 167, 490
Diagramme de Goodman, 477
Diagramme de Haigh, 477
Diagramme de Hasse, 34, 157, 162, 172, 188, 190, 191, 195, 200
Diagramme de Hertzprung-Russell, 157, 171, 181, 183
Diagramme de Jablonski, 501, 502, 503

Diagramme de Jones, 479
Diagramme de jonglerie, 162, 173, 491
Diagramme de Kiviat, 162, 457
Diagramme de l'œil, 467, 480, 481
Diagramme de Latimer, 170, 171
Diagramme de Lexis, 162, 457, 458
Diagramme de Minkowski, 162, 175, 201, 230, 231, 232, 503
Diagramme de Moody, 480
Diagramme de nœud, 162, 172, 492, 493
Diagramme de Penrose-Carter, 118, 162, 172, 201, 234, 235, 236, 443, 503
Diagramme de phases, 171, 214, 215, 218, 220, 221, 222, 223
Diagramme de Pourbaix, 481, 482
Diagramme de Ramachandran, 482, 483
Diagramme de Randolph, 34, 162, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 447, 452
Diagramme de Streckeisen, 163, 167, 204, 448
Diagramme de tricot, 162, 491
Diagramme de Venn, 64, 65, 66, 67, 162, 270, 273, 452, 494, 499, 531
Diagramme de Voronoï, 162, 463, 464, 465
Diagramme de Wiggers, 484
Diagramme enthalpique, 34, 251, 280, 281, 282, 284, 300
Diagramme FAST, 163, 172, 452, 460, 461
Diagramme floral, 499, 500, 501
Diagramme horaire, 478
Diagramme Isotype, 157, 162, 171, 174, 184, 185, 186, 200, 396
Diagramme PERT, 163, 167, 463, 490
Diagramme sagittal, 162, 189, 191, 460, 462
Diagramme stratigraphique, 33, 69, 100, 101, 102
Diagramme ternaire, 170, 171, 201, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 250, 448
Matrice de Harris, 100
Mode d'emploi, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 445, 447, 530, 533, 534, 549

RESUME/ABSTRACT

Science opérative et ingénierie sémiotique : des machines graphiques à la morphogenèse organique

Résumé :

Cette étude comprend trois parties : la première est problématique, la seconde est analytique, la troisième est programmatique.

La première partie présente le cadre théorique de l'ingénierie sémiotique, sa problématique, son héritage et son articulation à la problématique des représentations diagrammatiques. Une analyse historique et génétique de la pensée opératoire, conduisant à la représentation algorithmique, nous contraint à devoir reconnaître que la représentation diagrammatique est irréductible à la représentation algorithmique. Pour cette raison, la représentation diagrammatique est porteuse d'un supplément d'intelligibilité d'ordre sémiotique qu'il faut caractériser.

C'est ce à quoi nous nous attelons dans la deuxième partie de ce travail, en proposant des analyses de diagrammes dans divers champs du savoir, qu'ils soient théoriques ou appliqués. Notre propos est en effet de proposer une méthodologie de l'intelligence artificielle qui caractérise l'oubli de la position logiciste et formaliste, à savoir le caractère symbolique, effectif et pourtant non computationnel des représentations diagrammatiques. C'est à la mise en évidence de moyens visuels d'élaborer des connaissances théoriques et pratiques à l'aide de représentations diagrammatiques que se consacre l'ingénierie sémiotique des systèmes diagrammatiques, nom que nous donnons à l'intelligence artificielle conçue et réalisée dans ce cadre. Car le système diagrammatique construit doit produire un sens dans le domaine pratique reconnu par ceux qui le lisent et l'utilisent comme un outil d'assistance à la résolution de problèmes non solubles par voie algorithmique. C'est pourquoi nous soutenons que les diagrammes sont des machines sémiotiques.

En articulant une théorie de l'inscription matérielle des savoirs (la théorie du support de B. Bachimont) à la théorie des processus d'individuation (qui nous vient de G. Simondon) grâce à la sémiotique diagrammatique (qui nous vient de C. S. Peirce), nous visons ainsi à soutenir deux thèses complémentaires : d'une part que *l'inscription diagrammatique correspond à l'enregistrement de la connaissance opératoire* (thèse 1) ; d'autre part que *la connaissance opératoire correspond à l'intuition et à l'actualisation analogiques de l'inscription diagrammatique* (thèse 2). La deuxième thèse, qui est la réciproque de la première, suppose la réhabilitation de l'analogie comme méthode d'invention.

En réinscrivant les diagrammes dans une histoire de la technique sur le long cours, nous montrons dans une troisième et dernière partie qu'ils ouvrent un nouveau chapitre de l'histoire de l'écriture, et apparaissent comme des technologies intellectuelles constitutives de nouvelles manières de penser et d'outiller la pensée. De même, en réinscrivant le raisonnement analogique dans une longue histoire de la science et de la technique, nous argumentons afin de réhabiliter la méthode de pensée analogique comme constituant une démarche rationnelle et valable, dès lors qu'elle s'exerce sous certaines conditions et dans certaines limites. Enfin, en argumentant en faveur de la thèse selon laquelle le diagramme est un dispositif sémio-technique au cœur du vivant, nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un outil pertinent pour comprendre les processus de morphogenèse dans le cadre d'une philosophie de la nature.

Mots-clés : Algorithme, Calcul, Calculabilité, Diagramme, Ingénierie sémiotique, Intelligence artificielle, Iconicité, Intuition, Machine, Morphogenèse, Opération, Philosophie de la nature, Raisonnement analogique, Sémiotique visuelle, Schéma.

Operative science and semiotic engineering: from graphic machines to organic morphogenesis**Abstract:**

This study is divided into three parts: the first is problematic, the second is analytical and the third is programmatic. The first part presents the theoretical framework of semiotic engineering, its problematic, its heritage and its articulation with the problematic of diagrammatic representations. A historical and genetic analysis of operative thought, leading to algorithmic representation, forces us to acknowledge that diagrammatic representation is irreducible to algorithmic representation. For this reason, the diagrammatic representation is the bearer of an additional intelligibility of a semiotic order that needs to be characterised.

This is what we try to do in the second part of this work, by proposing analyses of diagrams in different fields of knowledge, whether theoretical or applied. In fact, our aim is to propose a methodology of artificial intelligence that is characterized by the forgetting of the logicist and formalist position, namely the symbolic, effective and yet non-computational character of diagrammatic representations. The semiotic engineering of diagrammatic systems, as we call the artificial intelligence conceived and realised in this framework, is dedicated to the identification of visual means of elaborating theoretical and practical knowledge with the help of diagrammatic representations. For the diagrammatic system constructed must produce a meaning in the practical domain that is recognised by those who read it and use it as a tool for solving problems that cannot be solved algorithmically. This is why we argue that diagrams are semiotic machines.

By articulating a theory of the material inscription of knowledge (B. Bachimont's theory of support) with the theory of individuation processes (which comes from G. Simondon) thanks to diagrammatic semiotics (which comes from C. S. Peirce), we aim to support two complementary theses: on the one hand, that *diagrammatic inscription corresponds to the recording of operative knowledge* (thesis 1); on the other hand, that *operative knowledge corresponds to the analogical intuition and actualisation of the diagrammatic inscription* (thesis 2). The second thesis, which is the reciprocal of the first, presupposes the rehabilitation of analogy as a method of invention.

By reinscribing diagrams in a long history of technique, we show in a third and final part that they open a new chapter in the history of writing, appearing as intellectual technologies constituting new ways of thinking and of equipping thought. Likewise, by reinscribing analogical reasoning in a long history of science and technology, we argue for the rehabilitation of the method of analogical reasoning as a rational and valid approach, as long as it is exercised under certain conditions and within certain limits. Finally, by arguing for the thesis that the diagram is a semiototechnical device at the heart of the living, we hypothesise that it is a relevant tool for understanding the processes of morphogenesis within the framework of a philosophy of nature.

Keywords: Algorithm, Computation, Calculability, Diagram, Semiotic engineering, Artificial intelligence, Iconicity, Intuition, Machine, Morphogenesis, Operation, Philosophy of nature, Analogical reasoning, Visual semiotics, Schema.